

**Univerzita Karlova v Praze**  
**Přírodovědecká fakulta**

Studijní program: Geologie  
Studijní obor: Hospodaření s přírodními zdroji



**Eva Lázničková**

Měření magnetické susceptibility v rámci archeologické prospekce  
Magnetic susceptibility survey within the archaeological prospection

Bakalářská práce

Vedoucí bakalářské práce: PhDr. RNDr. Jiří Dohnal

Praha, 2014

Ráda bych poděkovala svému školiteli, PhDr. RNDr. Jiřímu Dohnalovi za jeho profesionální pomoc, spolupráci při terénním měření a cenné připomínky. Dále bych chtěla poděkovat PhDr. Jaroslavu Podliskovi, Ph.D. za archeologické konzultace a poskytnutí studijních materiálů. V neposlední řadě také děkuji Petru Karpíškovi, Janu Podolníkovu a Ing. Radku Šmakalovi za pomoc při terénním měření. Nakonec musím poděkovat za zapůjčení kapometru RNDr. Aleši Kapičkovu, CSc. z Geofyzikálního ústavu AV ČR.

**Prohlášení:**

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje a literaturu. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze dne 14. 8. 2014

Eva Lázníčková



Název práce: Měření magnetické susceptibility v rámci archeologické prospekce

Autor: Eva Lázníčková

Katedra (ústav): Ústav hydrogeologie, inž. geologie a užité geofyziky

Vedoucí bakalářské práce: PhDr. RNDr. Jiří Dohnal

Abstrakt: Předložená práce je zaměřena na problematiku využití měření magnetické susceptibility při archeologické prospekci a sestává ze dvou provázaných částí. Jádrem první části je rešerše zahrnující základní teoretické i praktické poznatky o měření magnetické susceptibility s důrazem na terénní prospekci a na uplatnění této metody v oblasti archeologických výzkumů. Tématem druhé části je plošný geofyzikální průzkum segmentu husitského obléhacího tábora u Nového hradu u Kunratic, realizovaný s využitím měření magnetické susceptibility a dalších vybraných geofyzikálních metod (magnetometrie, konduktometrie). Náplň této části zahrnuje terénní měření, zpracování dat a komplexní interpretaci výsledků v kontextu se všemi dalšími dostupnými informacemi.

Klíčová slova: magnetická susceptibilita, geofyzikální průzkum, archeologická prospekce, Nový hrad u Kunratic

Title: Magnetic susceptibility survey within the archaeological prospection

Author: Eva Laznickova

Department: Institute of Hydrogeology, Engineering Geology and Applied Geophysics

Supervisor: PhDr. RNDr. Jiri Dohnal

Summary: The work is focused on the use of magnetic susceptibility measurement in archaeological prospection and consists of two interconnected parts. The core of the first one is the background research including basic theoretical and practical knowledge of magnetic susceptibility measurement, with an emphasis on field prospecting and the application of this method in archaeological research. The theme of the second part comprises the areal geophysical survey of the segment of the Hussite siege camp by Novy hrad u Kunratic realized by means of magnetic susceptibility measurement and other selected geophysical methods (magnetometry, conductometry). The contents of this part includes the field measurement, data processing and complex interpretation of the results in connection with all other available information.

Keywords: magnetic susceptibility, geophysical survey, archaeological prospection, Novy hrad u Kunratic

## OBSAH

<b>Úvod</b>	<b>1</b>
<b>1 Měření magnetické susceptibility</b>	<b>2</b>
1.1 Fyzikální podstata . . . . .	2
1.2 Klasifikace látek dle magnetické susceptibility . . . . .	4
1.2.1 Diamagnetika . . . . .	4
1.2.2 Paramagnetika . . . . .	4
1.2.3 Feromagnetika . . . . .	5
1.2.4 Antiferomagnetika . . . . .	6
1.2.5 Parazitická feromagnetika . . . . .	6
1.2.6 Ferimagnetika . . . . .	7
1.3 Měrná magnetická susceptibilita a převody SI/CGS jednotek . . . . .	7
1.4 Magnetická susceptibilita hornin . . . . .	7
1.5 Magnetická susceptibilita půd . . . . .	8
1.6 Dynamická magnetická susceptibilita . . . . .	10
1.7 Aplikace v archeologii . . . . .	11
1.8 Přístroje pro měření magnetické susceptibility . . . . .	14
<b>2 Magnetometrie</b>	<b>16</b>
2.1 Princip metody . . . . .	16
2.2 Geomagnetické pole . . . . .	16
2.3 Aplikace v archeologii . . . . .	17
2.4 Měření magnetického pole . . . . .	17
<b>3 Konduktometrie</b>	<b>19</b>
3.1 Princip metody . . . . .	19
3.2 Elektromagnetické měření vodivosti . . . . .	19
3.3 Aplikace v archeologii . . . . .	20

<b>4</b>	<b>Historie lokality a geologické poměry</b>	<b>21</b>
4.1	Nový hrad u Kunratic . . . . .	21
4.2	Ležení u Nového hradu u Kunratic . . . . .	24
4.3	Geologické a geomorfologické poměry . . . . .	26
<b>5</b>	<b>Geofyzikální průzkum</b>	<b>28</b>
5.1	Geodetické vyměření . . . . .	28
5.2	Přístrojová technika . . . . .	31
5.2.1	Kapametr Bartington MS2 . . . . .	31
5.2.2	Magnetometr a gradiometr GSM-19, systém Overhauser . . . . .	31
5.2.3	Protonový magnetometr PM-2 . . . . .	31
5.2.4	Konduktometr CMD-MiniExplorer . . . . .	32
5.3	Metodika měření . . . . .	33
5.3.1	Kapametrie . . . . .	33
5.3.2	Magnetometrie . . . . .	33
5.3.3	Konduktometrie a in-phase . . . . .	33
5.4	Zpracování dat . . . . .	33
5.5	Stanovení střední kvadratické chyby měření . . . . .	34
5.5.1	Kapametrie . . . . .	34
5.5.2	Magnetometrie . . . . .	34
5.6	Výsledky měření a jejich interpretace . . . . .	34
5.6.1	Kapametrie . . . . .	34
5.6.2	Magnetometrie . . . . .	37
5.6.3	Konduktometrie . . . . .	39
5.6.4	In-phase . . . . .	43
	<b>Diskuze</b>	<b>47</b>
	<b>Závěr</b>	<b>49</b>
	<b>Použitá literatura</b>	<b>50</b>

## ÚVOD

Měření magnetické susceptibility je jednou z metod užívaných v rámci geofyzikální prospekce. V poslední době se zvyšuje její význam při archeologickém průzkumu, což souvisí s nedávnými pokroky v přístrojové technice. S touto aplikací měření magnetické susceptibility jsem se setkala již v průběhu předchozího studia, proto jsem využila příležitosti přispět s její pomocí k archeologickému výzkumu husitského ležení u Nového hradu u Kunratic a prohloubit tím své znalosti této metody. Pro porovnání a interpretaci bylo na dané lokalitě také provedeno měření magnetického pole a elektrické vodivosti.

V úvodní části této bakalářské práce je zavedena terminologie a nezbytný matematický aparát pro hlubší studium magnetické susceptibility. Následně je popsáno chování různých látek v magnetickém poli se zaměřením na materiály, které se mohou vyskytnout v rámci tématu. Dílčí podkapitoly pojednávají o různých druzích magnetické susceptibility (objemová/měrná, statická/dynamická) a o problematice fyzikálních jednotek (SI/CGS). Následuje důležitá část věnující se aplikaci magnetické susceptibility při archeologické prospekci a nakonec jsou popsány obecné principy přístrojů užívaných při terénním měření.

Druhá část se zabývá měřením magnetického pole. Tato část nemá za cíl podat vyčerpávající výklad, protože se v rámci práce jedná o metodu doplňkovou. Po popsání obecných principů následuje část o variacích geomagnetického pole (které je třeba odečíst při zpracování dat). Důležitá je podkapitola věnovaná aplikaci v archeologii.

Ve třetí části je popsáno měření elektrické vodivosti s důrazem na elektromagnetický způsob měření, které je doplněno o nezbytný výklad archeologické aplikace. Stejně jako předchozí kapitola, ani tato si neklade za cíl podat úplný výklad tématu.

Čtvrtá část popisuje nezbytné historické souvislosti vzniku tábora a jeho stavby, rozmístění obranných a obytných prvků, s následným morfologickým a geologickým popisem lokality. Informace obsažené v této kapitole jsou důležité pro správnou interpretaci výsledků měření.

Pátá část se zabývá samotným geofyzikálním průzkumem části husitského tábora. V úvodu popisuje podmínky panující během měření, dále vysvětluje systém souřadnic a geometrii měření, popisuje použité přístroje včetně nejdůležitějších parametrů (hloubkový dosah, měřicí rozsah, rozlišení), metodiku měření, zpracování dat a určení střední kvadratické chyby měření. Na závěr jsou uvedeny výsledky měření a jejich komplexní interpretace v kontextu se všemi dostupnými informacemi.

## 1. MĚŘENÍ MAGNETICKÉ SUSCEPTIBILITY

### 1.1 Fyzikální podstata

Definujme pojem magnetické pole. Je to prostor, ve kterém na magnet nebo cívku s protékajícím proudem působí magnetická síla (Gruntorád 1985).

K rozboru magnetického pole si stanovíme bod  $E$  ležící v magnetickém poli, který je popsán těmito fyzikálními veličinami:

$U$  – magnetický potenciál [A]

$\vec{H}$  – intenzita magnetického pole [ $\text{A m}^{-1}$ ]

$\vec{B}$  – magnetická indukce, někdy také nazývaná magnetické pole [T]

Zároveň platí (poslední vztah pouze v kartézských souřadnicích):

$$\vec{H} = -\nabla U = -\text{grad}U = \left( -\frac{\partial U}{\partial x}, -\frac{\partial U}{\partial y}, -\frac{\partial U}{\partial z} \right) \quad (1)$$

Intenzita magnetického pole  $\vec{H}$  v bodě  $E$  má směr největšího poklesu magnetického potenciálu  $U$  v okolí bodu  $E$ .

Vztah mezi magnetickou indukcí a intenzitou magnetického pole je dán:

$$\vec{B} = \mu \vec{H}, \quad (2)$$

kde  $\mu$  je permeabilita prostředí v okolí bodu  $E$ , její jednotka je [ $\text{T m A}^{-1}$ ].

Magnetická indukce  $\vec{B}$  tedy, na rozdíl od intenzity magnetického pole  $\vec{H}$ , zohledňuje vliv látky v prostředí, jímž se pole šíří.

Permeabilita  $\mu$  vyjadřuje vliv prostředí nebo materiálu na účinky působícího magnetického pole. Počítá se jako součin:

$$\mu = \mu_0 \mu_r, \quad (3)$$

kde  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ T m A}^{-1} \approx 1,2566370161 \times 10^{-6} \text{ T m A}^{-1}$  je permeabilita vakua,  $\mu_r$  je relativní permeabilita popisující vliv prostředí nebo materiálu. Relativní permeabilita vody, vzduchu a slabě magnetických hornin je přibližně rovna 1. Proto pro magnetické pole ve vzduchu lze použít vztah:

$$\vec{B}_0 = \mu_0 \vec{H} \quad (4)$$

Pro magnetické pole v materiálu je vhodné rozdělit vztah pro magnetickou indukci na 2 části – magnetickou indukci ve vakuu a v materiálu. Magnetická indukce v materiálu se často značí jako magnetická polarizace  $\vec{J}$  [T]. Dostáváme pak vztah:

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{J} \quad (5)$$

Pokud vložíme objekt do magnetického pole, objekt se zmagnetizuje a sám se stane zdrojem magnetického pole. Velikost zmagnetizování látky se popisuje fyzikální veličinou magnetizace  $\vec{M}$ , jejíž jednotkou je [A m<sup>-1</sup>]. Pro magnetickou polarizaci  $\vec{J}$  platí:

$$\vec{J} = \mu_0 \vec{M} \quad (6)$$

Magnetizaci  $\vec{M}$  (a obdobně i magnetickou polarizaci  $\vec{J}$ ) je možno rozdělit na 2 složky:

$$\vec{M} = \vec{M}_i + \vec{M}_r, \quad (7)$$

kde  $\vec{M}_i$  je indukovaná magnetizace a  $\vec{M}_r$  je remanentní magnetizace. Indukovaná magnetizace je způsobena aktuálně působícím magnetickým polem. Pro indukovanou magnetizaci  $\vec{M}_i$  platí (Bezveda a Langer 1979):

$$\vec{M}_i = \kappa \vec{H}, \quad (8)$$

kde  $\kappa$  je magnetická objemová susceptibilita, která je bezrozměrnou veličinou. U hornin závisí velikost magnetické objemové susceptibility  $\kappa$  zejména na druhu a množství feromagnetických minerálů obsažených v hornině, dále pak na tvaru a rozměru zrn.

Remanentní magnetizace  $\vec{M}_r$  je zbytkový magnetismus, který přetrval po zmagnetizování objektu v minulosti.

Magnetická susceptibilita  $\kappa$  úzce souvisí s magnetickou permeabilitou  $\mu$ . Pokud do rovnice (5) dosadíme z rovnic (4) a (6), dostaneme:

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{J} = \mu_0 \vec{H} + \mu_0 \vec{M} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M}) \quad (9)$$

Po dosazení z rovnice (8) a porovnáním s rovnicí (2):

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \kappa \vec{H}) = \mu_0 (1 + \kappa) \vec{H} = \mu \vec{H} \quad (10)$$

získáváme vztah mezi magnetickou susceptibilitou a magnetickou permeabilitou:

$$\mu = \mu_0 (1 + \kappa) \quad (11)$$

Neboli po dosazení z rovnice (3):

$$\mu_r = 1 + \kappa \quad (12)$$

Podle hodnoty magnetické susceptibility  $\kappa$  je možno látky rozdělit do několika kategorií.

## 1.2 Klasifikace látek dle magnetické susceptibility

### 1.2.1 Diamagnetika

Diamagnetika mají magnetickou susceptibilitu malou a zápornou (Mareš 1979). Při vložení do vnějšího pole vzniká slabá magnetizace opačná k orientaci vnějšího pole. Souvisí to s jevem zvaným Larmorova precese elektronových orbitalů (jev podobný precesi setrvačníku), který vytváří přidavné magnetické pole opačné k vnějšímu. V okamžiku odstranění vnějšího magnetického pole magnetizace vymizí. Magnetická susceptibilita diamagnetických látek je nezávislá na teplotě. Příklady diamagnetických minerálů jsou křemen a kalcit, které mají susceptibilitu kolem  $-10^{-5}$  SI, jak ukazuje Tab. 1.

### 1.2.2 Paramagnetika

Paramagnetika jsou látky, jejichž atomy obsahují nespárované elektrony. Celkový magnetický moment atomu nebo iontu je nenulový. Díky chaotickému tepelnému pohybu má každý jednotlivý magnetický moment náhodnou orientaci, a tedy paramagnetikum jako celek nemá magnetický moment. Toto se mění při aplikaci vnějšího pole, kdy se jednotlivé momenty atomů či iontů orientují paralelně s magnetickým polem. Magnetizace má tedy stejnou orientaci jako vnější pole a její síla je vnějšímu poli přímo úměrná. Magnetická susceptibilita je nepřímo úměrná teplotě, jak je dáno Curieovým zákonem:

$$\kappa = \frac{C}{T - T_C}, \quad (13)$$

kde  $C$  je konstanta charakteristická pro daný materiál a  $T_C$  je Curieova teplota (Weissova konstanta). Při zvyšující se teplotě narůstá tepelný chaotický pohyb atomů či iontů, který působí proti uspořádání ve vnějším magnetickém poli. Pod Curieovou teplotou se magnetické momenty uspořádají a látka přestane být paramagnetickou.

Tab. 1. Objemová magnetická susceptibilita vybraných diamagnetických minerálů (Hunt a kol. 1995).

minerál	$\kappa$ ( $10^{-6}$ SI)
křemen	-13 až -17
kalcit	-7,5 až -39
draselný živec	-13 až -17

Tab. 2. Objemová magnetická susceptibilita vybraných paramagnetických minerálů (Hunt a kol. 1995).

minerál	$\kappa$ ( $10^{-6}$ SI)
illit	410
montmorilonit	330 až 350
ortopyroxeny	1500 až 1800
olivín	1600

U paramagnetik se stejně jako u diamagnetik projevuje Larmorova precese, která zeslabuje magnetické pole; její vliv je ovšem zanedbatelný. Mnoho minerálů je paramagnetických za běžných teplot, např. jílové minerály, chlorit, amfibol, pyroxen a olivín. Jejich susceptibilita se pohybuje mezi  $10^{-4}$  a  $10^{-3}$  SI, jak ukazuje Tab. 2.

### 1.2.3 Feromagnetika

Feromagnetika, na rozdíl od paramagnetických a diamagnetických látek, mají nezanedbatelnou interakci mezi jednotlivými atomovými magnetickými momenty. Atomy v krystalové mřížce jsou uspořádány tak těsně, že dovolují výměny elektronů mezi sousedními atomy. Vytváří se silné molekulární pole, které uspořádává atomové magnetické momenty a vyvolává spontánní magnetizaci.

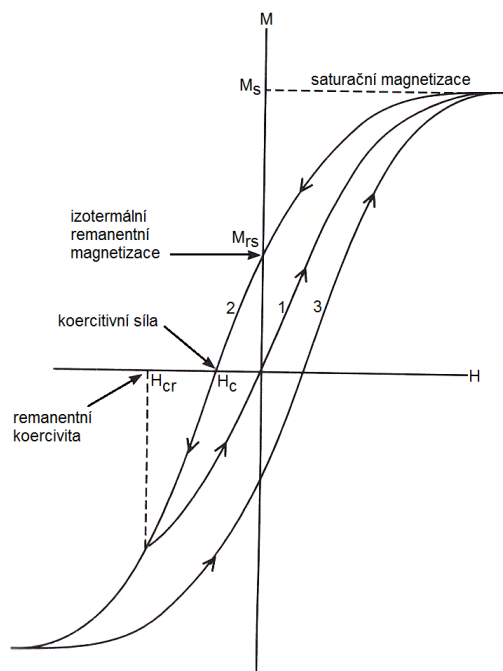
Feromagnetické vlastnosti hornin jsou dány obsahem velkého počtu malých zrněk feromagnetických minerálů.

Chování feromagnetického materiálu vykazuje tzv. hysterezi, jak lze vidět na Obr. 1. Pokud umístíme nezmagnetované feromagnetikum do vnějšího magnetického pole, probíhá závislost magnetizace  $M$  na intenzitě magnetického pole  $H$  dle křivky 1 (tzv. panenská křivka). Při zvyšujícím se  $H$  se snižuje přírůstek  $M$  až do dosažení saturační magnetizace  $M_s$ , kde další zvyšování vnějšího pole magnetizaci nemění. Pokud budeme snižovat velikost vnějšího pole, nebude probíhat závislost magnetizace po křivce 1, ale bude sledovat křivku číslo 2 (dochází k hysterezi). Při nulovém vnějším poli zůstává v materiálu zbytková, neboli remanentní magnetizace  $M_{rs}$  (při návratu ze stavu nasycení se jedná o izotermální remanentní magnetizaci). Aby remanence vymizela, je třeba působení opačně orientovaného vnějšího pole o velikosti tzv. koercitivní síly  $H_c$ . Pokud síla přestane působit, bude remanentní magnetizace nižší než původní izotermální magnetická remanence. Abychom dosáhli nulové remanentní magnetizace po odstranění vnějšího pole, je třeba působit opačným vnějším polem o velikosti remanentní koercivity  $H_{cr}$ . Zvyšuje-li se dále velikost vnějšího pole v záporných hodnotách, dochází k přemagnetování feromagnetika, které může pokračovat až do saturační magnetizace. Při snižování vnějšího pole by se pak závislost magnetizace řídila křivkou číslo 3.

Poměry  $\frac{M_{rs}}{M_s}$  i  $\frac{H_{cr}}{H_c}$  závisí na velikosti zrn feromagnetického materiálu v hornině.

Při zahřívání feromagnetického materiálu zmizí spontánní magnetizace nad Curieovou teplotou  $T_C$ . Nad ní se z feromagnetika stává paramagnetikum a pro magnetickou susceptibilitu platí nepřímá úměra dle vztahu (13).





Obr. 1. Hysterezní křivka magnetizace feromagnetika (Lowrie 1997).

#### 1.2.4 Antiferomagnetika

V krystalech oxidů, kde kovové ionty jsou příliš vzdáleny pro přímou výměnu elektronů, může v některých případech docházet k výměně přes elektronový oblak kyslíkového iontu. Tato nepřímá výměna způsobuje protichůdné uspořádání sousedních magnetických momentů a celkový magnetický moment materiálu je vyrušen. Magnetická susceptibilita antiferomagnetického krystalu je malá a kladná, remanentní magnetizace není možná. Antiferomagnetické chování vymizí nad Néelovou teplotou, kdy se materiál stane paramagnetickým. Jelikož je Néelova teplota mnoha látek velice nízká, jsou za běžných teplot paramagnetické. Příkladem může být antiferomagnetický minerál ilmenit ( $\text{FeTiO}_3$ ), jehož Néelova teplota je 50 K.

#### 1.2.5 Parazitická feromagnetika

Minerál hematit ( $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ) vykazuje typické známky feromagnetické látky (hystereze, spontánní magnetizace, Curieova teplota), aniž by byl skutečnou feromagnetickou látkou. Jedná se o antiferomagnetický krystal, u něž nejsou protichůdné magnetické momenty plně kompenzovány (díky tvaru krystalové mřížky a díky tomu, že magnetické momenty nejsou zcela paralelně uspořádány). Hematit má slabou spontánní magnetizaci a velmi vysokou koercitivitu. Magnetická susceptibilita hematitu se pohybuje v rozmezí 0,5 až 40 ( $10^{-3}$  SI) (Hunt a kol. 1995).

Tab. 3. Objemová magnetická susceptibilita vybraných ferimagnetických minerálů (Hunt a kol. 1995).

minerál	$\kappa$ ( $10^{-3}$ SI)
magnetit	1000 až 5700
goethit	1,1 až 12
pyrhotin	0,46 až 1400
maghemit	2000 až 2500

### 1.2.6 Ferimagnetika

Jedná se o oxidy kovů s antiparalelně uspořádanými momenty jako u antiferomagnetik, ale s krystalovou mřížkou složenou z několika podmřížek. Nejvýznamnějším příkladem je spinelová struktura, kde se střídá tetraedrické a oktaedrické uspořádání s  $\text{Fe}^{3+}$  a  $\text{Fe}^{2+}$  ionty. Díky nepřímým výměnám elektronů dojde k antiparalelní magnetizaci podmřížek, jejich velikosti ovšem nejsou stejné, což vyústí v celkovou spontánní magnetizaci materiálu. Ferimagnetické materiály (nazývané také ferity) vykazují magnetickou hysterezi i remanentní magnetizaci. Nad jistou teplotou (někdy nazývaná Néelova, jindy zase Curierova) přechází ferimagnetikum v paramagnetikum.

Nejvýznamnějším ferimagnetickým materiálem je magnetit ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), dále pak goethit ( $\alpha\text{-Fe}^{3+}\text{O}(\text{OH})$ ), pyrhotin ( $\text{Fe}_{(1-x)}\text{S}$ , kde  $x = 0 - 0,17$ ) a maghemit ( $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ), jejichž susceptibilita je srovnána v Tab. 3.

### 1.3 Měrná magnetická susceptibilita a převody SI/CGS jednotek

Dosud byla zmiňována pouze objemová magnetická susceptibilita. Při měření odebraných vzorků však může záviset magnetická susceptibilita na jejich hmotnosti a tvaru (Quijano 2011). Proto se zavádí také měrná magnetická susceptibilita  $\kappa_m$ :

$$\kappa_m = \frac{\kappa}{\rho}, \quad (14)$$

kde  $\kappa$  je objemová magnetická susceptibilita [-] a  $\rho$  je hustota vzorku [ $\text{kg m}^{-3}$ ]. Měrná magnetická susceptibilita  $\kappa_m$  již není bezrozměrná, ale má jednotku [ $\text{m}^3 \text{kg}^{-1}$ ].

V předchozím textu jsme uvažovali pouze jednotky SI. Mnoho tabulek ovšem používá jednotky CGS, které vycházejí z odlišné definice permeability vakua (Bennett a kol. 1977). Výsledkem je tedy odlišná hodnota objemové magnetické susceptibility v obou soustavách (přestože je bezrozměrná). Přepočet je následující:

$$\kappa^{SI} = 4\pi\kappa^{CGS} \quad (15)$$

### 1.4 Magnetická susceptibilita hornin

Magnetická susceptibilita je jednou z důležitých vlastností hornin. V oblasti magnetických metod prospekce hraje podobnou roli jako hustota u gravimetrie. Horniny s vysokým obsahem feromagne-

Tab. 4. Objemová magnetická susceptibilita hornin (Hunt a kol. 1995).

horniny	$\kappa$ ( $10^{-3}$ SI)
bazické vyvřelé	0,55 až 120
kyselé vyvřelé	0,038 až 82
metamorfované	0 až 73
sedimentární	0 až 50

tických a ferimagnetických minerálů mají také vysoké hodnoty magnetické susceptibility. Bazické a ultrabazické horniny mají susceptibilitu nejvyšší, kyselé vyvřelé a metamorfní horniny mají střední hodnoty a nejnižší hodnoty susceptibility mají horniny sedimentární (Tab. 4). Toto srovnání je pouze přibližné, rozsahy jednotlivých typů hornin se mohou překrývat. Například magnetická susceptibilita metamorfovaných hornin je závislá na mateřské hornině. Záleží také na tvaru a uspořádání minerálních zrn v hornině. V případě uspořádání zrn může dojít k anizotropii (např. u sedimentárních nebo metamorfovaných hornin), kdy se budou lišit magnetické vlastnosti horniny v závislosti na směru měření (Reynolds 2011).

### 1.5 Magnetická susceptibilita půd

Magnetické vlastnosti půdy jsou na regionální úrovni ovlivněny obsahem magnetických minerálů v mateřské hornině a pedogenezi. Komponenty obsahující železo jsou relativně nerozpustné, a tedy vykazují tendenci se v půdě koncentrovat. V mírném vlhkém klimatu je to goethit ( $\alpha$ -Fe<sup>3+</sup>O(OH)), v suchém pak převládá hematit ( $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). V oglejených půdách se pak často vyskytuje lepidokrokrit ( $\gamma$ -Fe<sup>3+</sup>O(OH)), který se po vysušení půdy může změnit na mnohem silněji magnetický maghemit ( $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) (Clark 1996).

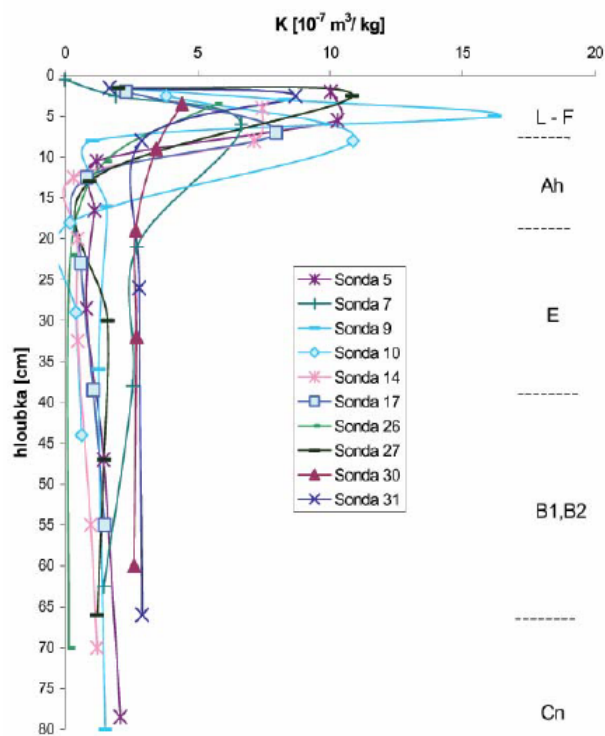
Na lokální úrovni existuje mnoho procesů, přírodních i antropogenních, které mohou zvýšit magnetickou susceptibilitu půdy (viz Tab. 5 a Tab. 6). Všechny zahrnují vznik ferimagnetických složek z jiných forem. Tyto procesy zahrnují způsob využití půdy, biologické procesy i pálení. Obecně je magnetická susceptibilita vyšší v blízkosti povrchu (jak lze vidět na Obr. 2), což zřejmě souvisí s oxidačními procesy. Povrchovou susceptibilitu může také způsobovat spád z antropogenní činnosti (například průmyslové spalování). (Dearing a kol. 1996)

Tab. 5. Měrná magnetická susceptibilita dle typu půdy, Anglie (Dearing a kol. 1996).

typ půdy	$\kappa_m$ [ $10^{-6}$ m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup> ]
hnědé podzolové půdy	3,56
typické hnědozemě	1,49
hnědé rendziny	0,94
typické aluviální glejové půdy	0,45
typické stagnogleje	0,36
humické železem bohaté podzoly	0,27

Tab. 6. Měrná magnetická susceptibilita dle způsobu využití půdy, Anglie (Dearing a kol. 1996).

způsob využití	$\kappa_m [10^{-6} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}]$
lada bylinná	1,19
orná půda	0,70
listnatý les	0,70
jehličnatý les	0,36



Obr. 2. Vertikální profil měrné magnetické susceptibility lesní půdy Krkonošského národního parku (Kapička a Petrovský 2004).

## 1.6 Dynamická magnetická susceptibilita

Dosud jsme uvažovali statickou magnetickou susceptibilitu v konstantním magnetickém poli  $H_{DC}$  (někdy se nazývá stejnosměrnou magnetickou susceptibilitou, anglicky „DC magnetic susceptibility“). Nyní budeme uvažovat střídavé magnetické pole (Herchel a kol. 2009):

$$H_{AC} = H \cos(\omega t), \quad (16)$$

kde  $\omega = 2\pi f$ .

Magnetizace  $M$  se pak bude také měnit a může dojít ke zpoždění za magnetickým polem  $H$  o fázový úhel  $\varphi$ :

$$M_{AC} = M \cos(\omega t - \varphi) \quad (17)$$

Po rozepsání dle vzorce pro cosinus rozdílu úhlů dostaneme:

$$M_{AC} = M \cos(\omega t) \cos \varphi + M \sin(\omega t) \sin \varphi \quad (18)$$

Jednoduchou úpravou dostaneme:

$$M_{AC} = H \left( \frac{M}{H} \cos \varphi \right) \cos(\omega t) + H \left( \frac{H}{M} \sin \varphi \right) \sin(\omega t) \quad (19)$$

Pro celkovou magnetickou susceptibilitu pak dostáváme:

$$\kappa_{AC} = \dot{\kappa} \cos(\omega t) + \ddot{\kappa} \sin(\omega t) \quad (20)$$

dále platí:

$$\dot{\kappa} = \kappa \cos \varphi \quad (21)$$

$$\ddot{\kappa} = \kappa \sin \varphi \quad (22)$$

$$\kappa = \sqrt{\dot{\kappa}^2 + \ddot{\kappa}^2} \quad (23)$$

$$\varphi = \arctan \left( \frac{\ddot{\kappa}}{\dot{\kappa}} \right) \quad (24)$$

$$\kappa = \dot{\kappa} + i \ddot{\kappa} \quad (25)$$

Máme tedy 2 složky dynamické magnetické susceptibility – reálná (in-phase) složka, která v nízkofrekvenční limitě odpovídá statické magnetické susceptibilitě (Martien 2002), a imaginární (out-of-phase) složka, která odpovídá disipativním procesům (např. vířivé proudy u vodivých vzorků). Pro paramagnetika je imaginární složka nulová.

V praxi se někdy měří reálná složka v závislosti na frekvenci. Například senzor Bartington MS2B měří in-phase složku při 470 Hz a 4700 Hz. Získaná diferenciální magnetická susceptibilita  $\kappa_{fd}$  (rozdíl hodnot při těchto dvou frekvencích) je pak závislá na množství ultrajemných magnetických zrn.

Vzrůst diferenciální susceptibility odpovídá vzrůstu zastoupení ultrajemných magnetických zrn (například pozůstatků magnetotaktických bakterií) a může být spolu s vyšší hodnotou magnetické susceptibility jedním z indikátorů kulturního využití půdy (Dalan 2008).

### 1.7 Aplikace v archeologii

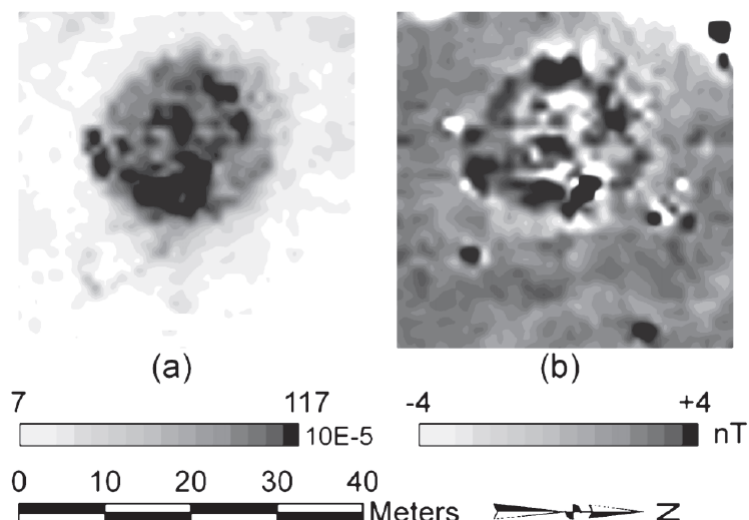
Měření magnetické susceptibility nebylo v minulosti tak dalece užíváno v archeologické prospekci jako jiné geofyzikální metody, např. magnetometrie nebo odporové metody. Nedávné pokroky v přístrojové technice ovšem zvýšily zájem o tuto metodu.

Magnetická susceptibilita je definována jako poměr indukované magnetizace a intenzity magnetického pole (8). Průzkum pomocí magnetické susceptibility je citlivý pouze na indukovanou složku, na rozdíl od magnetometrie, která nerozlišuje mezi indukovanou a remanentní magnetizací. Měření magnetické susceptibility může tedy vhodným způsobem doplňovat magnetometrický průzkum, jak lze vidět na Obr. 3 (Dalan 2008).

Jak již bylo zmíněno v kapitole 1.5, mohou být horní vrstvy půdy magneticky obohaceny oproti podpovrchovým vrstvám. Obecně souvisí vznik kontrastu v magnetické susceptibilitě s přeměnou slabě magnetických oxidů a hydroxidů na silně magnetické formy. Mechanismů, které to způsobují, je široké spektrum: přirozené i lidmi založené ohně, nízkoteplotní chemické reakce, magnetotaktické<sup>1</sup> a železo redukující bakterie a bakteriemi indukované chemické reakce (Evans a Heller 2003). Zvýšený magnetický signál v půdě zůstane, i když je hluboce pohřbená, pokud nedojde k oglejení nebo nejsou železné minerály zredukovány jiným způsobem.

Půdy z kulturních archeologických vrstev jsou magneticky obohaceny oproti ostatním vrstvám. Obohacení závisí nejen na klimatu a matečné hornině, ale také na rozsahu osídlení, na rozsahu použití ohně (tzv. Le-Borgnův efekt – konverze hematitu na magnetit za přítomnosti organické hmoty při teplotách 150 °C až 570 °C, oxidace na maghemit při následném ochlazení), na množství organického materiálu (bakterie spouštějí přeměnu oxidů železa na více magnetické formy) a na míře zanesení materiálů s vysokou magnetickou susceptibilitou (úlomky keramiky a cihel) (Schmidt 2009). Lidé také často přemísťují půdní vrstvy. Příkopy a jámy vykopané do podpovrchové vrstvy s nízkou susceptibilitou se mohou zanést magneticky obohacenou půdou (či organickým odpadem, který poskytne vhodné podmínky pro magnetické obohacení).

<sup>1</sup>Bakterie, které v sobě vytváří krystalky magnetitu pro navigaci v zemském magnetickém poli.



Obr. 3. Místo středověké produkce dřevěného uhlí, Eskdale, Cumbria. Plocha 40 m × 40 m s rozlišením 1 m × 1 m.

a) Magnetická susceptibilita měřená Bartington MS2D

b) Gradiometrický průzkum pomocí Geoscan FM36

Měření magnetické susceptibilita lépe ohraničuje archeologické těleso (Schmidt 2007).

Kapametrie (měření magnetické susceptibilita) se používá jak pro horizontální, tak i vertikální průzkum. Při horizontálním průzkumu se hledají archeologicky zajímavé lokality ve vymezené ploše, a to buď přímo v terénu, nebo laboratorní analýzou odebraných vzorků. Při vertikálním průzkumu se zkoumá obohacení jednotlivých půdních vrstev, a to buď laboratorně analýzou vrtných jader, nebo in situ spouštěním sondy do vrtných otvorů.

Kapametrie byla úspěšně použita pro zhodnocení archeologických území. Může být využita na lokalizaci osídlení, identifikaci výrobní aktivity a obhospodařované půdy. Není již tolik vhodná pro průzkum pozůstatků kamenných budov a zdí. Nepotřebuje vysoce kontrastní rozhraní, jako jiné geofyzikální metody (magnetometrie nebo konduktometrie). Na podloží tvořeném vyvrěnými horninami a v oblastech s magnetickou interferencí může nahradit magnetometrii (Clark 1996).

Nejvhodnější použití kapametrie je předběžný průzkum na velkém území (viz Obr. 4), kterým se identifikují „oblasti zájmu“ pro podrobnější průzkum a poté společný průzkum s magnetometrií na vybraných lokalitách (David 1995).

Jako každá metoda, i kapametrie má svá omezení. Studie magnetické susceptibilita by neměla být použita v situaci, kdy byly oxidy železa zredukovány např. v glejových a podzolových půdách. Dalším omezením může být vegetace, která významně snižuje hloubku efektivní penetrace (pouze u jednocívkových přístrojů) a dále pak přítomnost kovových objektů.

Penetrační hloubka při terénním povrchovém průzkumu je omezená. Nicméně studie v Anglii ukázaly, že díky bioturbaci mohou být studovány i hlubší vrstvy. Žížaly a jiné organismy zanášejí magneticky obohacenou půdu z nižších vrstev do vyšších. Jiným jevem kompenzujícím omezenou penetrační hloubku je zemědělské využití půdy, kdy se svrchní část půdy promíchává a magneticky obohacené

### Magnetic Susceptibility Readings [ $10E-5$ ]

- 0 - 10
- 10 - 20
- 20 - 30
- 30 - 40
- 40 - 70



Obr. 4. Využití magnetické susceptibility při pátrání po zaniklé středověké vesnici, Kirkby Overblow, North Yorkshire. Měřeno Bartington MS2D, zobrazeno pomocí škálovaných teček a Voronoiových cel ve stupních šedi. Protože se hodnota susceptibility může výrazně měnit, identifikuje se oblast zájmu jako seskupení několika sousedících cel s vysokou hodnotou (Schmidt 2007).



vrstvy se dostávají blíže k povrchu (Schmidt 2007).

Při měření magnetické susceptibility se musí vzít v úvahu také kompaktifikace půdy (např. vyšlapané a uježděné cestičky), protože terénní senzory měří objemovou susceptibilitu a neberou v potaz rozdílnou hustotu. Zvýšení hustoty zvýší objemovou magnetickou susceptibilitu, protože se v daném objemu zvýší množství magnetických částic (Fritz a kol. 2011).

## **1.8 Přístroje pro měření magnetické susceptibility**

Rozlišujeme dva základní typy přístrojů pro měření magnetické susceptibility – dvoucívkové a jednocívkové.

Dvoucívkové přístroje jsou také známy jako systém slingram. Jsou složeny z oddělených cívek pro vysílání a přijímání signálu. Při archeologické prospekci (zejména v USA) je používán například přístroj Geonics EM38 (Geonics Ltd., Kanada, <http://www.geonics.com>). Dvoucívkové přístroje jsou preferovány před jednocívkovými, protože poskytují větší hloubku penetrace (70 až 80 cm) a jsou méně ovlivněny konduktivitou půdy. Další výhodou je také necitlivost vůči vegetaci. Díky větší hloubce penetrace jsou méně citlivé na kompaktifikaci půdy než jednocívkové přístroje.

Jednocívkové přístroje (Tab. 7) používají jedinou cívku jako vysílač i přijímač. Vyžadují přímý kontakt s půdou. Při archeologické prospekci (zejména v Anglii) je používán přístroj Bartington Instruments MS-2, který při použití sondy MS2D dosahuje v terénu hloubky penetrace až 10 cm. V České republice se vyrábí několik typů jednocívkových přístrojů pro měření magnetické susceptibility, konkrétně v Brně. Jedná se o firmy, které vznikly jako pokračovatelky státního podniku Geofyzika. Na rozdíl od dvoucívkových přístrojů nejsou tyto aparatury ovlivňovány elektromagnetickým rušením, jako jsou dráty elektrického vedení nebo atmosférická elektřina.

S hloubkou penetrace signálu rychle klesá rozlišení, pro zachování rozlišení se pak musí sonda spouštět do vrtu. Pro tento způsob užití existují řešení založená jak na dvoucívkovém (Geonics EM39S), tak i jednocívkovém (Bartington Instruments MS2H) principu.

Tab. 7. Několik příkladů současných výrobců jednocívkových přístrojů pro měření magnetické susceptibility.

<b>Výrobce</b>	<b>Model</b>	<b>URL</b>	<b>Poznámka</b>
Bartington Instruments (Anglie)	MS-2	<a href="http://www.bartington.com">www.bartington.com</a>	terénní sondy MS2D (hloubka max 10 cm) a MS2F (hloubka max 1 cm), také laboratorní varianty
Agico, s.r.o. (Brno)	MFK I	<a href="http://www.agico.com">www.agico.com</a>	laboratorní
SatisGeo, s.r.o. (Brno)	KM-7	<a href="http://www.satisgeo.com">www.satisgeo.com</a>	přenosná varianta, hloubka cca 2 cm
Zdeněk Hůlka - ZH Instruments (Brno)	SM-105	<a href="http://www.zhinstruments.com">www.zhinstruments.com</a>	laboratorní i terénní, hloubka cca 2 cm
Terraplus Inc. (Kanada)	KT-20	<a href="http://www.terraplus.ca">www.terraplus.ca</a>	přenosná varianta

## 2. MAGNETOMETRIE

### 2.1 Princip metody

Základní teorie magnetometrie již byla nastíněna v kapitole 1. Na rozdíl od měření magnetické susceptibility jsou magnetometry pasivními přístroji, které zaznamenávají celkovou magnetizaci horniny. Celková magnetizace se skládá z indukované složky a remanentní složky.

Přirozená remanentní magnetizace (NRM) může mít několik příčin. U vyvřelých hornin je nejvýznamnější termoremanentní magnetizace, kdy při ochlazení pod Curieovu teplotu „zamrzne“ vnějšími vlivy indukované pole ve feromagnetických (ferimagnetických) minerálech. U sedimentárních hornin je významnou složkou detritická remanentní magnetizace, kdy se při sedimentaci v klidné vodě mohou zrnka natočit ve směru aktuálního zemského magnetického pole. Dalšími typy mohou být chemická remanentní magnetizace (při vzniku krystalů), viskózní remanentní magnetizace a izotermální remanentní magnetizace. U vyvřelin se NRM pohybuje řádově mezi  $10^{-3}$  a  $10^1 \text{ A m}^{-1}$ , u sedimentárních hornin je pak NRM většinou do  $10^{-2} \text{ A m}^{-1}$  (Mareš 1979).

Indukovaná magnetizace (8) je vyvolána zemským magnetickým polem. Geomagnetické pole v blízkosti povrchu Země má původ převážně v zemském jádru. Dalšími činiteli geomagnetického pole jsou proudy v ionosféře a magnetosféře (Van Allenovy pásy).

### 2.2 Geomagnetické pole

Hlavní složkou geomagnetického pole je dipólové pole. Dá se představit jako dipólový magnet umístěný ve středu Země a odkloněný od rotační osy o  $11,5^\circ$ . Pozice magnetického pólu se s časem mění. Intenzita vertikální složky dipólového pole se pohybuje od  $3 \times 10^4 \text{ nT}$  na magnetickém rovníku do cca  $6 \times 10^4 \text{ nT}$  na magnetických pólech.

Geomagnetické pole není ideálním dipólem, neboť má i nedipólovou složku. Ta se projevuje především jako tzv. kontinentální anomálie o amplitudách až  $2 \times 10^4 \text{ nT}$ .

Na daném místě dochází také k časové změně geomagnetického pole. Dlouhodobé (tzv. sekulární) variace mají periodu od let až do cca  $10^4$  let a neovlivňují tedy terénní měření. Z krátkodobých variací jsou pro magnetometrický průzkum nejdůležitější denní variace. Závisí na zeměpisné šířce a ročním období, mají velikost řádově desítky nT a je třeba při měření nebo zpracování dat tyto variace kompenzovat. Existují také velmi krátké variace trvající sekundy až minuty o amplitudách řádově jednotek nT, vyvolávané vesměs sluneční aktivitou. V případě magnetických bouří se pak magnetometrická prospectice často zcela přerušuje.

### 2.3 Aplikace v archeologii

Magnetometrie je jednou z nejvýznamnějších pasivních geofyzikálních metod používaných při archeologické prospekci. Využívá se vysoce citlivých přístrojů, kterými se měří magnetické pole Země. Železné objekty a nehomogenity v magnetických vlastnostech půdy způsobují anomálie měřeného pole. Objekt s magnetickou susceptibilitou vyšší než okolí vytvoří indukovaný magnetický dipól, který se vektorově sečte se zemským polem a vytvoří anomálii. Intenzita anomálie samozřejmě závisí nejen na magnetizačním kontrastu, ale také velmi silně na hloubce objektu. Oproti měření magnetické susceptibility měří magnetometrie nejen zemským polem indukovanou magnetizaci, ale také magnetizaci remanentní.

Indukovaná magnetizace závisí na magnetické susceptibilitě půdy (na obsahu magneticky aktivních částic v půdě, zejména magnetitu, maghemitu a hematitu). Proto je archeologické užití magnetometrie velmi podobné jako měření magnetické susceptibility – detekce ohnišť, jam s organickým obsahem, prohlubní zaplněných magneticky obohacenou půdou a vyhořelých domů. Díky magnetotaktickým bakteriím se stávají magnetickými i takové objekty, jako jsou dřevěné části opevnění.

Díky termoremanentní magnetizaci (TRM) některých archeologických materiálů je možno navíc magnetometrií vyhledávat objekty jako jsou cihly, keramika, dlaždice, krby a některé zdi (Piro 2009). Tato TRM vzniká v okamžiku, kdy jíl obsahující částice magnetitu ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) a maghemitu ( $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ) je zahřát na relativně vysokou teplotu (Curieova teplota těchto minerálů se pohybuje v rozmezí 578-675°C) a pak schlazen za přítomnosti geomagnetického pole. I kdyby jíl obsahoval pouze hematit ( $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ) nebo goethit ( $\alpha\text{-Fe}^{3+}\text{O(OH)}$ ), zahřátí způsobí přeměnu na feromagnetické minerály (Schmidt 2007).

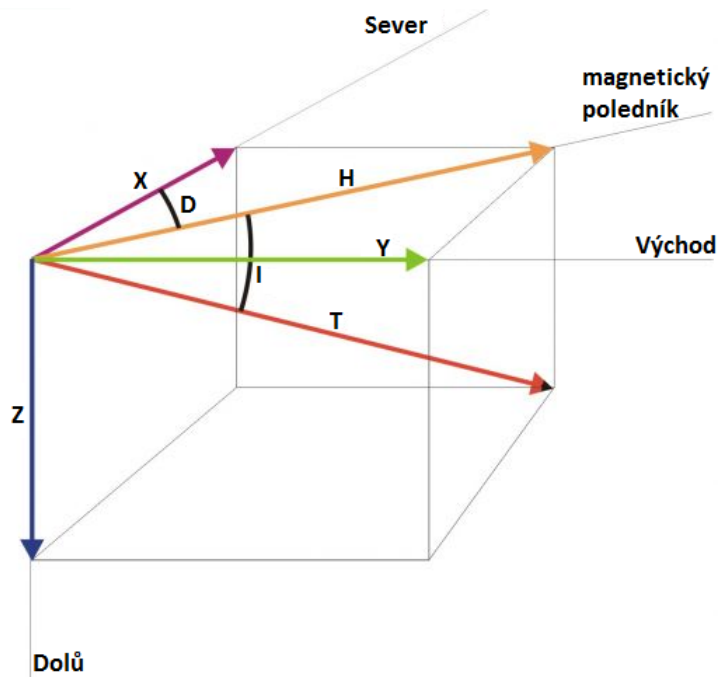
Pokud je třeba nalézt základy zdiva, které nevykazuje kontrast díky TRM, je vhodnější použít například odporové metody. Magnetometrie se příliš nehodí pro hledání malých objektů, jako jsou jámy po kůlech. Není také vhodná pro hledání hrobů, protože jsou většinou zasypány stejným materiálem, v jakém byly vykopány.

### 2.4 Měření magnetického pole

V praxi se používají zejména magnetometry měřící vertikální složku Z celkového pole (flux-gate magnetometry) a magnetometry měřící velikost celkového magnetického pole T (např. césiové magnetometry). Magnetometry měřící vertikální složku Z jsou směrově citlivé a musí se s nimi měřit velmi opatrně, zatímco magnetometry druhého typu vykazují velkou toleranci vůči změnám směru měření. Pro definici složek Z a T viz Obr. 5 a Tab. 8.

U všech měření je třeba monitorovat krátkodobé variace geomagnetického pole druhým magnetometrem. Vhodné je tedy použití tzv. gradiometru, což je přístroj se dvěma senzory se záznamem rozdílu jejich naměřených hodnot. Toto uspořádání eliminuje efekty variací geomagnetického pole a v nepřítomnosti anomálie ukazuje přístroj nulovou hodnotu (Schmidt 2009).

Magnetometrický průzkum je rychlý a dá se jím efektivně pokrýt relativně velká oblast – měl by předcházet ostatní (pomalejší) metody, které se pak zaměří na vybrané části lokality.



Obr. 5. Složky geomagnetického pole: severní horizontální složka **X**, východní horizontální složka **Y**, vertikální složka **Z**, celková horizontální složka **H**, celková intenzita pole **T**, magnetická deklinace **D**, magnetická inklinace **I** (INGV 2014).

Tab. 8. Velikosti složek geomagnetického pole spočítané dvěma modely (IGRF 11 a WMM 2010) pro polohu Nového hradu u Kunratic ke dni 20.5.2014 (NOAA 2014).

	<b>IGRF 11</b>	<b>WMM 2010</b>
<b>D</b>	3°26'20"	3°20'19"
<b>I</b>	65°55'5"	65°56'18"
<b>H</b>	19965,9 nT	19953,4 nT
<b>X</b>	19939,0 nT	19919,6 nT
<b>Y</b>	1197,6 nT	1162,1 nT
<b>Z</b>	44672,0 nT	44686,8 nT
<b>T</b>	48930,9 nT	48939,2 nT

### 3. KONDUKTOMETRIE

#### 3.1 Princip metody

Elektrický proud je nesen nabitými částicemi. U kovů se jedná o volně se pohybující elektrony, u půdy se jedná o ionty disociované ve vodě. Vodivost půdy je tak dána obsahem soli, množstvím půdní vlhkosti, ale také velikostí zrn a pórů mezi nimi. Vodivost závisí na mobilitě iontů v roztoku – s rostoucí teplotou mobilita a tedy elektrická vodivost roste (při teplotě mrazu se vodivost nedá měřit díky velmi nízké mobilitě) (Schmidt 2009).

Měrný elektrický odpor (rezistivita) má jednotku [ $\Omega \text{ m}$ ] a je definován:

$$\rho = \frac{RS}{l}, \quad (26)$$

kde  $R$  je elektrický odpor vodiče [ $\Omega$ ],  $S$  je průřez vodiče [ $\text{m}^2$ ] a  $l$  je délka vodiče [ $\text{m}$ ].

Měrná elektrická konduktivita má jednotku [ $\text{S m}^{-1}$ ] a je definována:

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (27)$$

Jelikož je půda nehomogenním prostředím, mluvíme o měření zdánlivé konduktivity, respektive o měření zdánlivého odporu.

#### 3.2 Elektromagnetické měření vodivosti

Zařízení pro elektromagnetické měření vodivosti vysílají nízkofrekvenční magnetické pole pomocí vysílací cívky. Toto magnetické pole indukuje v půdě vířivé proudy, které odpovídají elektrické vodivosti půdy. Sekundární magnetické pole indukované vířivými proudy je měřeno druhou cívkou (společně s primárním polem). Za jisté podmínky, zvané aproximace nízkého indukčního čísla (LIN – low induction number), se dá nalézt přímý vztah mezi zdánlivou vodivostí a poměrem magnetických polí (ASTM 2008):

$$\sigma = \left( \frac{4}{\omega \mu_0 s^2} \right) \left( \frac{H_s}{H_p} \right), \quad (28)$$

kde  $\omega = 2\pi f$  ( $f$  je frekvence [ $\text{Hz}$ ]),  $\mu_0$  je permeabilita vakua,  $s$  je vzdálenost mezi cívkami [ $\text{m}$ ] a  $\frac{H_s}{H_p}$  je poměr mimofázové složky sekundárního a primárního magnetického pole.

Oproti stejnosměrným elektrickým metodám jsou EM přístroje méně účinné při charakterizaci objektů s nízkou vodivostí.

### **3.3 Aplikace v archeologii**

Typickým pohřbeným objektem zanechaným lidským osídlením je příkop. Po opuštění sídliště je příkop postupně zanesen sedimenty. Tyto sedimenty mají zpravidla relativně vysokou pórovitost, a tedy i vyšší vodivost než okolí.

Vyšší vodivost oproti okolí však souvisí s počasím. V suchém počasí je půda suchá a jen zasypaný příkop si drží vlhkost ve spodních partiích, což vede k vysokému kontrastu. Při déletrvajícím suchu vyschne i příkop a vodivostní kontrast se ztratí. Při dešti příkop díky větším pórům rychleji vsákne vodu, což opět způsobí vysoký kontrast. Pokud déšť přetrvává několik dnů, je vše promočeno a kontrast se opět ztratí. Po dešti, pokud svítí slunce a vane silnější vítr, vysychá příkop lépe díky velkým pórům a způsobí negativní kontrast ve vodivosti. Nastíněné situace jsou idealizované a ve skutečnosti závisí na mnoha dalších faktorech, například schopnosti podloží odvádět vodu (Schmidt 2009).

Dalším častým pohřbeným archeologickým objektem jsou základy zdí. Kamenné základy mají obvykle vodivost nižší než okolní vlhká půda. V suchém počasí se samozřejmě vodivostní kontrast snižuje.

## 4. HISTORIE LOKALITY A GEOLOGICKÉ POMĚRY

### 4.1 Nový hrad u Kunratic

Nový hrad u Kunratic (latinsky Novum Castrum), také nazývaný Nový Hrádek či německy Wenzelstein, stával na ostrohu nad Kunratickým potokem severozápadně od Kunratic (Durdík 1995). Do současnosti se dochovaly pouze trosky (umělecká rekonstrukce je znázorněna na Obr. 6). Zřícenina se nachází na parcele č. 863/1 katastrálního území Kunratice [728314] v Kunraticko-michelském lese. Souřadnice WGS 84: 50°1'10" s.š., 14°28'17" v.d., 293 m n. m.

Roku 1411 král Václav IV. nechal vybudovat Nový hrad u Kunratic. Kromě krásné přírody byla také důvodem stavby malá vzdálenost od Pražského hradu (Bauer 2005).

Následuje citace kronikáře Václava Hájka z Libočan: „*Král český pro svú ukrutnost málo pánům českým věřil. Protož poslal a kázal místa příhodného k stavění zámku hledati, i nalezeno místo jedno v lese, málo víc než půl míle od Vyšehradu, blízko od tvrze, jež slove Kundratice, i ohledav to král sám svú osobú, kázal tu les posekati a skálu lámati. Sklepy hluboké dělati z cihel a zámek pevný na tom místě postaviti a dal jemu jméno Nový hrad, kterýž když byl dokonán, kázal jej pilně obilím a jinými potřebami bez nedostatku opatřiti, právě, že tu chce vší zemi brániti.*“ (Bartoníček 1940).

Stavbu řídil konšel Nového města Hertvín<sup>1</sup>. Stavitelem se stal mistr Kříž, který již měl za sebou realizaci Novoměstské radnice. Přidělen jim byl písař Blažej. Stavba byla zřejmě velmi rychlá, již následujícího roku musel stát hradní palác, protože zde již pobýval král.

Hrad byl koncipován spíše jako lovecký hrádek, než jako rezidence krále, ovšem se silnými fortifikačními prvky (Bauer 2005). Stavitelé si museli poradit s omezeným prostorem. Dominantou hradu byl věžovitý královský palác postavený z kamení a cihel. Měl obdélníkový půdorys délky 21 m a šířky 7,5 m, zdivo bylo silné 170 cm (Sedláček 1998). Představoval hlavní obytnou stavbu hradu, v přízemí obsahoval tři místnosti a pravděpodobně i ve vyšších patrech. K paláci bylo přimknuto vnitřní nádvoří, obsahující několik budov, jejichž přesný účel není znám (Obr. 7). Z paláce se přes kolébkový padací most a vlčí jámu<sup>2</sup> dostávalo na vnější nádvoří, obklopené parkánem<sup>3</sup>. Z parkánu pak přes čtverhrannou bránu vedl most přes mohutný šíjový příkop 18 m široký a 9 m hluboký. Před bránou byl umístěn padací most, který dále pokračoval mostem pevným. Poloha paláce i celého hradu byla koncipována

<sup>1</sup>Magister Fabriciae (Rector Fabriciae), administrativní organizátor stavby (Durdík 1999)

<sup>2</sup>Padací kolébkový most je dvouramennou pákou upevněnou na ose ve středu. Po vytažení klesla přední část do suterénu a odhalila příkop, tzv. vlčí jámu, která byla dalším obranným prvkem.

<sup>3</sup>Parkán je jedním z fortifikačních prvků hradebních opevnění. Jde o prostor před hlavní hradbou, chráněný zdí, valem či palisádou, umožňující chráněný pohyb obránců hradu (zejména lučištníků).





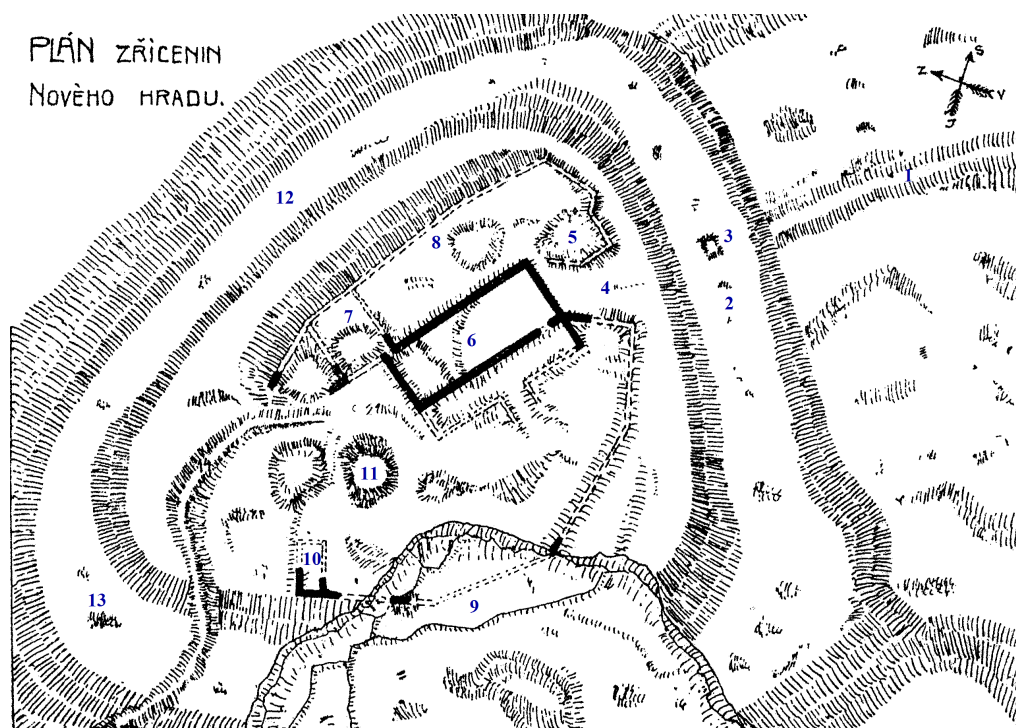
Obr. 6. Umělecká rekonstrukce Nového hradu u Kunratic (upravená fotografie z infotabule v místě zříceniny, autoři kresby Ing. arch. Ondřej Šefců a Olga Pokorná).

tak, aby směrem k šíjovému příkopu směřovala užší část objektu, pro ztížení případného ostřelování. V údolí byl vybudován rybník, ze kterého se v případě potřeby dalo zaplavit celé údolí.

Po smrti krále Václava zanechal na hradě posádku jeho bratr Zikmund Lucemburský. Hladoví vojáci prováděli z hradu výpady a narušovali zásobování Prahy. To byl důvod k zahájení obléhání hradu husitskými vojsky o Vánocích roku 1420. Ta s sebou přivezla tři děla a tři velké dobývací praky. Samotné obléhání trvalo tři týdny. Postupně byly rozbity všechny střechy a po přesunu menšího obléhacího stroje před samotný hrad také podsebití<sup>4</sup>. Následně posádka hradu vyjednala jeho bezpečné opuštění. Když však husité viděli, že jsou odváženy i vzácné spisy, vzali hrad útokem a vyrabovali ho. Součástí hradu byla vzácná knihovna obsahující mnoho astrologických rukopisů, které Václav IV. sbíral (Bláhová 1979). Druhý den byl hrad vypálen a zdi pobořeny do základů.

Hrad následně chátral, nebyl nikdy obnoven. Roku 1736 byla mezi ruinami postavena kaple svatého Jana Nepomuckého a hájovna. Hájovna spolu s kaplí byla zrušena 1787. Na místě byly v 18. století otevřeny lomy, ze kterých byla získávána kvalitní břidlice na výrobu brousků pro šperkařství. V roce 1881 byla nadzemní část hradu srovnána se zemí (zdi byly vysoké cca 5 m), aby hrad nepřitahoval návštěvníky, kteří by mohli plašit zvěř v okolí (Merhout 1912). Současný stav hradu lze vidět na Obr. 8.

<sup>4</sup>Hradby této doby nebyly osazeny střílnami a po zničení podsebití se hrady nedaly prakticky nijak bránit.



Obr. 7. Plán zříceniny Nového hradu: 1 – cesta ke hradu na předhradí, 2 – hradní příkop, 3 – mostnice, 4 – městiště brány, 5 – obranná stavba při bráně, 6 – palác, 7 – čeledníky, 8 – obvodová zeď, 9 – lom, 10 – hájovna, 11 – kaple sv. Jana Nepomuckého, 12 – cesta pod severní částí hradiště, 13 – příkop v konci opyše (Merhout 1912).



Obr. 8. Současný stav hradu – pohled na vchod do paláce s vlčí jámou.



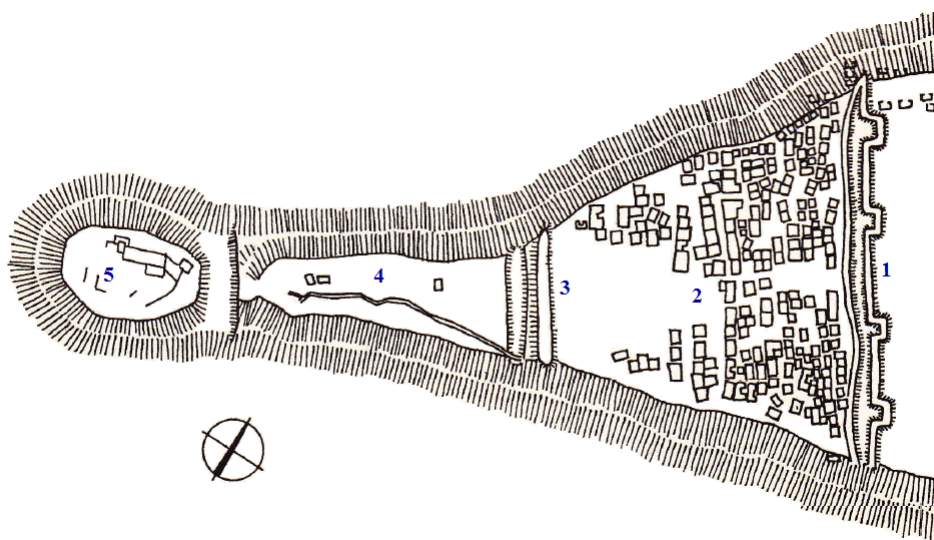
## 4.2 Ležení u Nového hradu u Kunratic

Obléhání Nového hradu u Kunratic začalo 30. 12. 1420 a skončilo 25. 1. 1421 (Dolejší a Křížek 2009). Vavřinec z Březové stručně zaznamenal tažení ve své Husitské kronice: „*Item že s Hradu Nového silnice, aby špíže do Prahy vezena byla, měla překážku, a protož posledního dne měsíce prosince Pražané svůj lid jízdný, pěší, s vozy poslali a zpravili sou dobývati Nového Hradu a ihned na vrch hory Hřeben blízko příkop hradu boudy a stany rozbili sou a ohradili se příkopy se všech stran, aby se mohly nepřátelům brániti a z pušek a ze tří prakův nesčíslné kameny metali sou, tak že všechny střechy kamením zeprali sou. A přiblíživše se na příkopy zdvihli sou prak, z něhožto všechny havíře s podsebitím zbili sou.*“ (Drobná 1953).

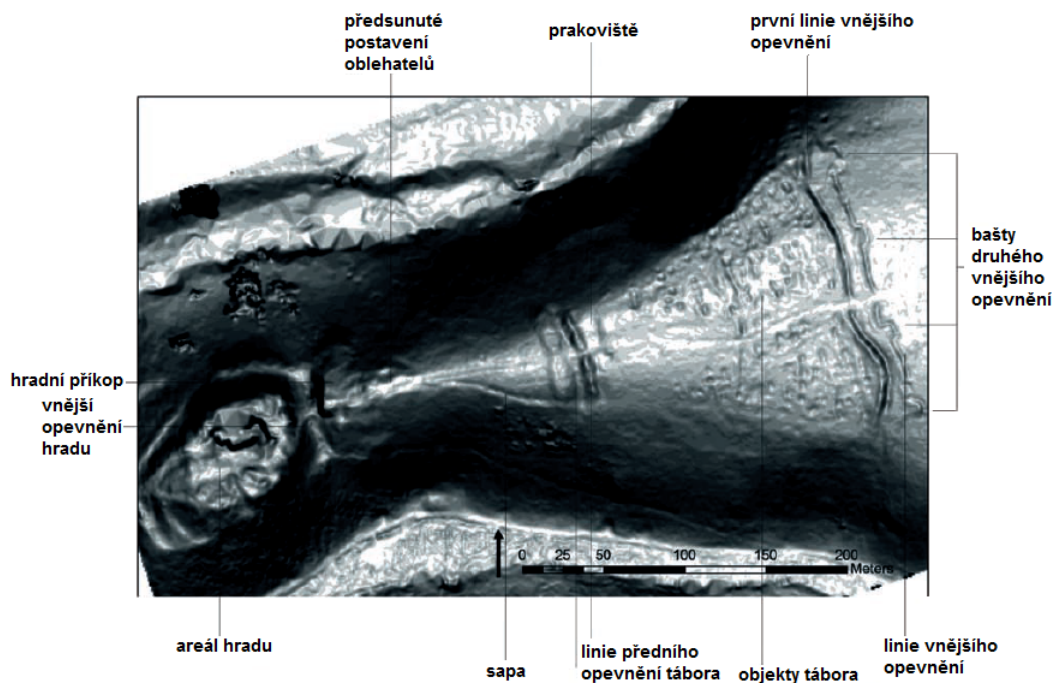
Obléhač tábor byl založen na ostrožně, z boku byl dostatečně chráněn prudkými svahy (Menclová 1972). Čelo tábora, vzdálené od hradního příkopu cca 150 m, chránil příkop a sypaný val v délce 55 m. Valem byla přehrazena přístupová cesta k hradu. Výška valu je 110 cm, v době husitské mohla být asi 160 cm nad úrovní terénu (Durdík 1953), celkový výškový rozdíl mezi dnem příkopu a vrcholem valu mohl být asi 3 m. V zadní části byl tábor opevněn dvojitým valem a příkopy vybudovanými kvůli obavě, že by se Zikmund pokusil hrad z obležení vysvobodit (Obr. 9). Vnitřní zadní val byl vyšší, vnější zadní val byl na vnější straně zpevněn čtyřmi čtvercovými baštami. Ani na jednom z valů se nepodařilo nalézt stopy po palisádě. Zadní valy zřejmě uprostřed přerušovala komunikace.

V táboře lze vidět 220 jam, jedná se o reliktu zemniček (Obr. 10). Jámy jsou uspořádány do uliček a koncentrovány na straně vzdálenější od hradu. Směrem k hradu vytváří jakýsi půloblouk, mohl by odpovídat dostřelu hradního děla. V nezastavěném prostoru byly zřejmě umístěny obléhačské praky. O existenci hradního děla se usuzuje z nálezů olovené střely zaryté v předním valu na straně přivrácené k hradu. Střela byla válcovitého tvaru o průměru 6 cm a délce 8 cm, což odpovídá ráži středověké tarasnice (Drobná 1953). Z reliéfu není patrné umístění velitelského objektu, což může souviset s rovnostářským přístupem v husitském vojsku. Na předním valu byla nalezena kameny zpevněná plošina a pod valem několik kamenných koulí o průměru 40 cm, vypovídajících o umístění praku.

Při archeologickém průzkumu tábora v roce 1952 byly nalezeny známky osídlení z mladší doby kamenné (cca 3000 let př. n. l.), dále pak ojedinělé nálezy z doby železné a bronzové.



Obr. 9. Půdorys obléhacího tábora před Novým hradem u Kunratic (Durdík 1999).  
 1 – vnější opevnění tábora, 2 – plocha tábora se zemnicemi oblehatelů, 3 – opevnění proti hradu s palebnými postaveními děl a prakovišti, 4 – sapa (přibližovací zákop), 5 – hrad

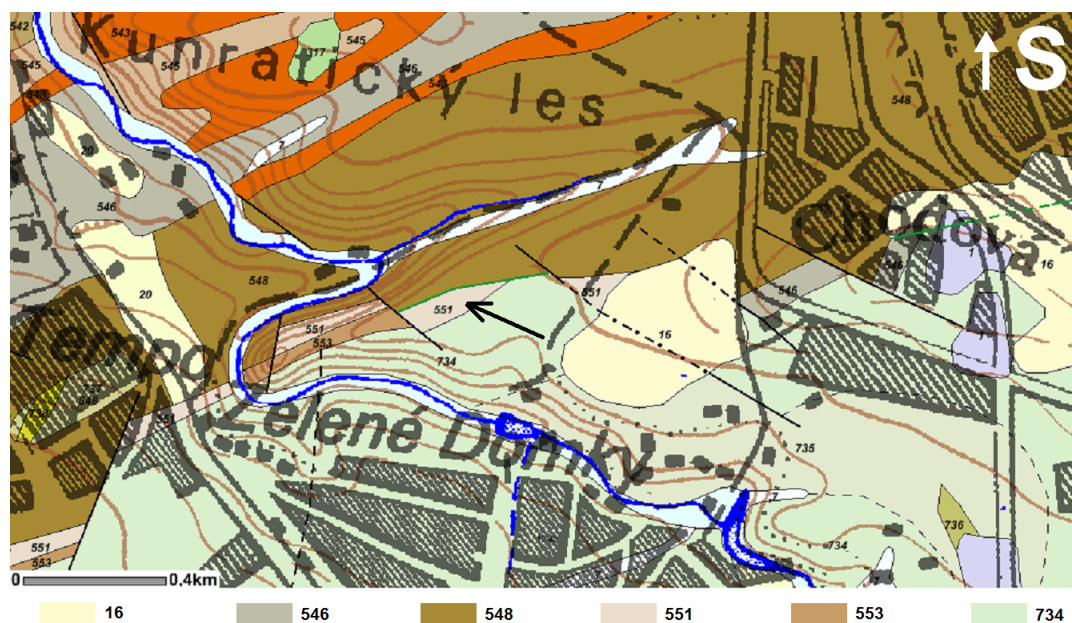


Obr. 10. Lidarový snímek čtvrté generace husitského ležení s Novým hradem u Kunratic upravený algoritmem curvature (Koscelník 2013).

### 4.3 Geologické a geomorfologické poměry

Podloží Nového hradu a obléhacího tábora je tvořeno jednak horninami z období svrchního prote-rozoika, jednak sedimenty z období paleozoika. Paleozoikum je zastoupeno dvěma souvrstvími or-dovického stáří – třenickým souvrstvím (stupeň tremadok) a klabavským souvrstvím (stupeň arenig) (Chlupáč 1988). Situace je znázorněna na Obr. 11. Nejběžnějšími horninami jsou jílovité břidlice, prachovce a droby tmavě šedé až zelenošedé barvy (Kotrlová 2013).

Původně nepravidelný povrch ostrožny byl při výstavbě hradu zarovnan a v některých místech zahlou-ben (zvláště v oblasti příkopu). Odtěžený materiál posloužil při stavbě hradu. Terén v oblasti tábora je rovinatý, pokrytý travnatým porostem listnatého lesa, což zpomalilo jeho erozi. Erozní činnost naopak způsobují cyklisté, kteří využívají zajímavého členitého terénu v obytné části tábora (zejména v jeho jižní části).



Obr. 11. Výřez geologické mapy s lokalitou Nového hradu u Kunratic a husitského ležení (Geomapa 1 : 50 000).

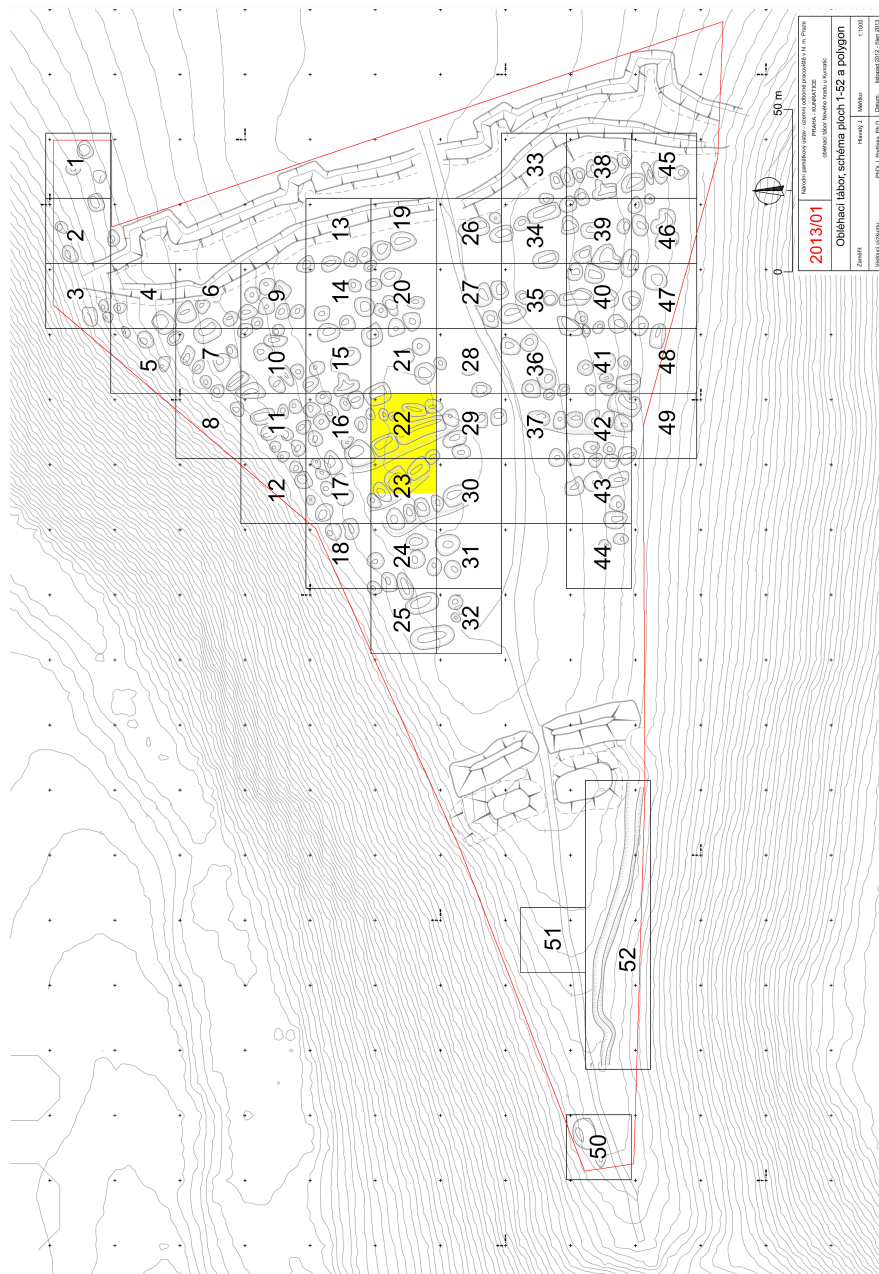
- 16** – spraš a sprašová hlína, kvartér
- 546** – jílovité břidlice, ordovik, dobrotivské souvrství
- 548** – černé břidlice, Fe rudy, ordovik, šárecké souvrství
- 551** – jílovité břidlice, droby, tufy, ordovik, klabavské souvrství
- 553** – křemenné pískovce, slepence, ordovik, třenické souvrství
- 734** – prachovce, břidlice, neoproterozoikum

## 5. GEOFYZIKÁLNÍ PRŮZKUM

Bylo provedeno měření čtverce 22 a zleva přilehlé poloviny čtverce 23 (viz Obr. 12). Měření proběhlo 20. 5. 2014 od cca 8 h do cca 18 h. V době měření se teplota vzduchu v Praze pohybovala od 14 °C do 25 °C, bylo jasno až polojasno, bez srážek. Obdobná situace panovala i několik dnů před měřením. V měřené oblasti se rozkládá listnatý les, silná vrstva listí se střídá s vysokým travním porostem a odhalenými místy.

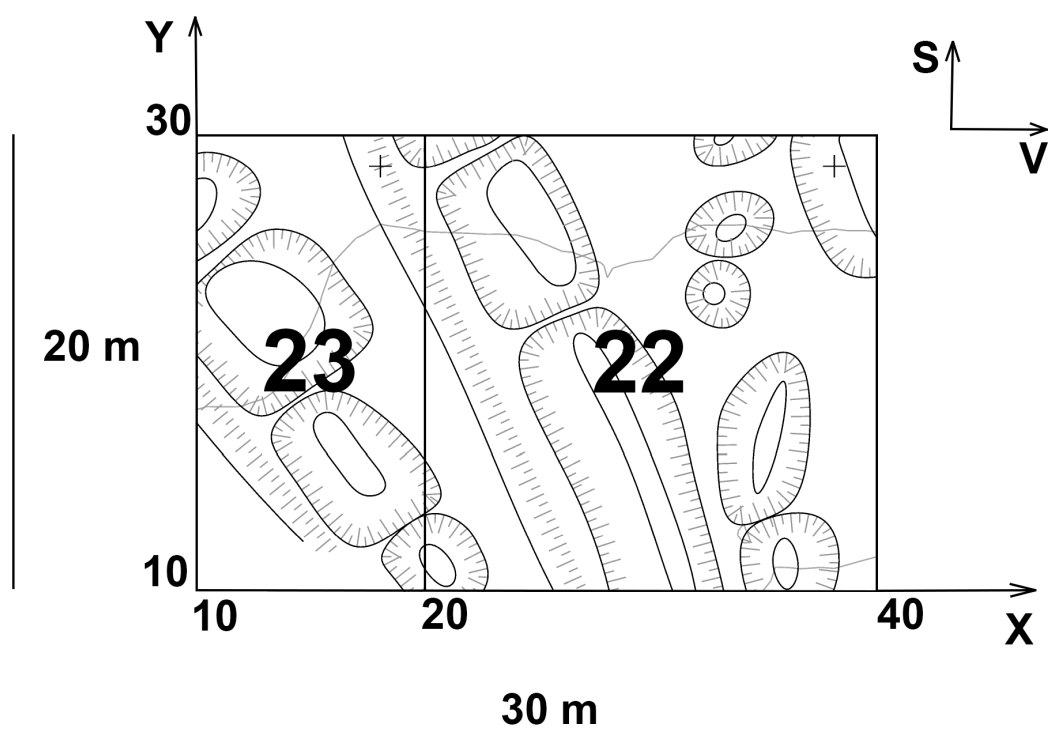
### 5.1 Geodetické vyměření

Geodetickým zaměřením byly vytyčeny (zakolíkované) krajní body čtverce 22 a zleva přilehlé poloviny čtverce 23, tedy celkem 6 kolíků. Celková měřená plocha byla 30 m × 20 m. Od východu k západu byly nataženy šňůry s rozstupem 2 m. Šňůry měly barevně vyznačen krok 1 m. Měření probíhalo podél šňůr (sudá čísla profilů) a uprostřed mezi nimi (lichá čísla profilů), což odpovídá 21 měřeným profilům s rozstupem 1 m značenými 10 až 30 směrem na sever (osa Y – profily). Měření podél šňůr probíhalo u barevných značek (celočíselné hodnoty) i uprostřed mezi nimi (neceločíselné hodnoty), což odpovídá 61 měřícím bodům s krokem 0,5 m značenými 10 až 40 směrem na východ (osa X – metráže). Celou situaci přehledně ukazuje Obr. 13.



Obr. 12. Schéma plochy obléhacího tábora (Kypta a Podliska 2013).





Obr. 13. Zobrazení měřené plochy s vyznačenou souřadnou soustavou (X – metráže; Y – profily).

## 5.2 Přístrojová technika

### 5.2.1 Kapametr Bartington MS2

Jedná se o přístroj britské společnosti Bartington Instruments Ltd určený pro laboratorní i terénní (v závislosti na použité sondě) měření magnetické susceptibility. Používá se v archeologické prospekci, studiu paleomagnetismu, analýze půd, hydrologii, sedimentologii atd. Sonda MS2D slouží k terénnímu průzkumu svrchních 10 cm půdy. Používá se pro studium svahových procesů a v archeologické prospekci.

- Hloubka odezvy: 50 % v 1,5 cm, 10 % v 6 cm
- Rozlišení: až  $2 \times 10^{-6}$  SI
- Měřicí rozsah: 0 až 0,1 SI

(Bartington MS2/MS3 2014)

### 5.2.2 Magnetometr a gradiometr GSM-19, systém Overhauser

Výrobce tohoto přístroje je GEM Systems Inc. v Kanadě. Měří totální složku magnetického pole i její vertikální gradient. Jedná se o vylepšený protonový magnetometr využívající Overhauserova efektu – do vodíkem bohaté kapaliny je přidána elektrony bohatá kapalina ve formě volných radikálů. Výsledkem je přístroj s mnohem vyšší citlivostí, než má běžný protonový magnetometr. Díky vysoké přesnosti a nízké ceně (ve srovnání s cesiovými magnetometry) je široce používán v nejrůznějších aplikacích (vyhledávání nerostných zdrojů, archeologie, inženýrská geologie, mapování inženýrských sítí, vyhledávání munice, vulkanologie atd.).

- Měřicí rozsah:  $2 \times 10^4$  až  $1,2 \times 10^5$  nT
- Rozlišení: 0,01 nT

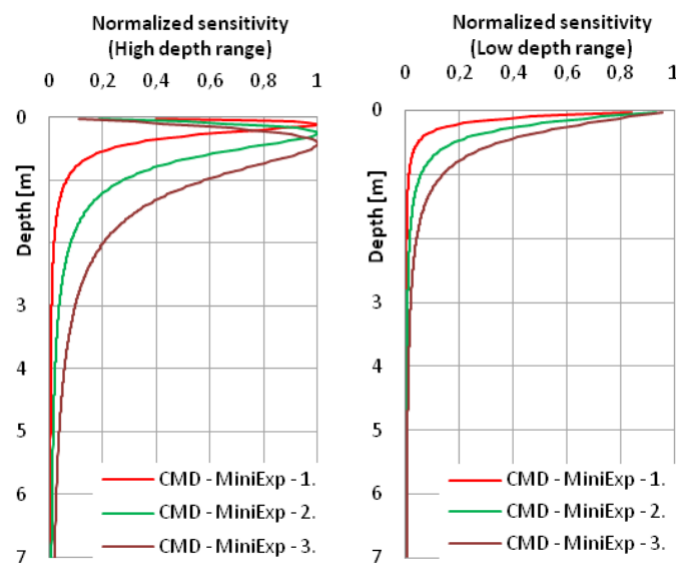
(Overhauser 2008)

### 5.2.3 Protonový magnetometr PM-2

Výrobce tohoto přístroje je Geofyzika, a.s. v Brně. Jedná se o standardní protonový magnetometr měřící totální složku magnetického pole. V našem případě byl využit k registraci krátkodobých variací geomagnetického pole v referenčním bodě.

- Měřicí rozsah:  $2,5 \times 10^4$  až  $8 \times 10^4$  nT
- Rozlišení: 0,1 nT

(PM-2 2011)



Obr. 14. Hloubková závislost citlivosti přístroje CMD-MiniExplorer pro 3 vzdálenosti cívek (GF Instruments 2013).

#### 5.2.4 Konduktometr CMD-MiniExplorer

CMD je přístroj sloužící k rychlému a bezkontaktnímu měření vodivosti země a také měření soufázové složky, tzv. in-phase. Výstupem měření mohou být mapy zdánlivé vodivosti v jedné nebo více hloubkových úrovních a vodivostní řezy. Přístroj lze použít pro geologický a archeologický průzkum, při přípravě staveb, v zemědělství, při ochraně životního prostředí a podzemních vod, při detekci kovových předmětů a podzemních sítí. Samotné měření je založeno na vyhodnocení sekundárního magnetického pole, indukovaného v zemi. Vysílač generuje sinusové magnetické pole s vertikální nebo horizontální orientací dipólu. Přijímač se shodnou orientací dipólu je umístěn na rameni o vhodné délce s ohledem na nominální hloubkový dosah při nízkém indukčním čísle. Přijímané sekundární magnetické pole se skládá ze dvou částí, a to z imaginární složky (out-of-phase), která je úměrná měrné vodivosti země a kalibrována v  $\text{mS m}^{-1}$ , a reálné složky (in-phase), která je určena magnetickými vlastnostmi a udává se v ppt ( $10^{-3}$ ) primárního pole. CMD-MiniExplorer je kalibrován pouze na povrchu země. Hloubková závislost citlivosti je uvedena na Obr. 14.

- Měřicí rozsahy:
  - Zdánlivá vodivost:  $10^3 \text{ mS m}^{-1}$ , rozlišení  $0,1 \text{ mS m}^{-1}$
  - In-phase:  $\pm 80 \text{ ppt}$ , rozlišení  $10 \text{ ppm}$
- Přesnost měření:  $\pm 4 \%$  na  $50 \text{ mS m}^{-1}$
- Teplotní stabilita:  $\pm 0,1 \text{ mS m}^{-1} \text{ K}^{-1}$

(GF Instruments 2013)

### 5.3 Metodika měření

#### 5.3.1 Kapametrie

Po každých deseti měřeních se provedlo zvednutí přístroje do vzduchu spojené s jeho vynulováním. Profil Y = 30 byl měřen dvakrát, pro stanovení chyby měření. Pro správné měření je potřebný přímý kontakt sondy s půdou. Kamení, dříví, pařezy, kmeny a vzrostlá tráva znesnadňovaly přímý kontakt. V případě, že nebylo možno překážku odstranit, bylo zvoleno náhradní místo měření vzdálené cca 10 cm od plánovaného místa měření. Ve svazích byla sonda nakloněna tak, aby kopírovala terén. Vrstva listí, zejména v prohlubních bývalých zemniček, snižovala kontakt s půdou, a tedy snižovala hodnotu magnetické susceptibility.

#### 5.3.2 Magnetometrie

K měření byl použit magnetometr a gradiometr GSM-19, byla měřena jak totální složka magnetického pole, tak i vertikální gradient magnetického pole. Ve variačním bodě byl umístěn protonový magnetometr PM-2 měřící totální složku magnetického pole.

#### 5.3.3 Konduktometrie a in-phase

Měření probíhalo v módu High, tedy efektivní (dosažení 75 % kumulativní citlivosti) hloubkový dosah byl:

- Konduktivita  $\sigma_1$  – vzdálenost cívek 0,32 m – hloubkový dosah 0,5 m
- Konduktivita  $\sigma_2$  – vzdálenost cívek 0,71 m – hloubkový dosah 1,0 m
- Konduktivita  $\sigma_3$  – vzdálenost cívek 1,18 m – hloubkový dosah 1,8 m

Byla měřena zdánlivá elektrická vodivost a in-phase složka, a to pro všechny tři hloubkové dosahy. Při měření byl dipól orientován v SJ směru, ovšem v některých případech musela být orientace změněna (přírodní překážky, tvar terénu).

### 5.4 Zpracování dat

Byly odstraněny záporné hodnoty konduktivity a in-phase složek. Záporné hodnoty indikují buď chybu přístroje, nebo měření pod rozlišovací schopnosti přístroje.

U dat z magnetometrie byly odečteny variace geomagnetického pole a následně byl od každé hodnoty odečten medián souboru.

Pro každou datovou sadu byly zjištěny základní statistické charakteristiky (min., max., medián, 90-tý a 99-tý percentil, případně vykreslena distribuce).

Data byla načtena v programu Surfer 11.0.642, k vytvoření gridu byla použita metoda kriging. Oproti výchozímu nastavení byl nastaven spacing v obou osách na 0,25, což lépe odpovídá polohám měřených bodů. Chybějící data byla interpolována.

Po vytvoření gridového souboru byla zkonstruována mapa izolinií. Ve výsledné mapě byly vyhlazeny izolinie (smoothing = high), což zjednodušuje čtení v mapě a přitom nesnižuje její kvalitu. Byla použita pětibarevná škála tak, aby se vizuálně odlišily střední a extrémní hodnoty (ICE BLUE pro min., YELLOW pro medián, RED pro 90-tý percentil, STORM BLUE pro 99-tý percentil a BLACK pro max.). Do každé mapy byl vložen náčrt umístění terénních útvarů (zemniček).

## 5.5 Stanovení střední kvadratické chyby měření

### 5.5.1 Kapametrie

Kvalita měření byla stanovena na základě opakovaného měření profilu Y = 30. Výpočet výběrové směrodatné odchylky z 61 dvojic paralelních stanovení se řídil vzorcem (VŠCHT 2014):

$$s = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{61} (\kappa_{i1} - \kappa_{i2})^2}{2 \times 61}} \quad (29)$$

Výsledná střední kvadratická chyba metody je  $\pm 3,3 \times 10^{-5}$  SI.

### 5.5.2 Magnetometrie

Bylo provedeno 41 opakovaných měření.

Střední kvadratická chyba měření totálního magnetického pole je  $\pm 4,5$  nT. Relativně vysoká hodnota chyby je způsobena vysokou úrovní variací geomagnetického pole.

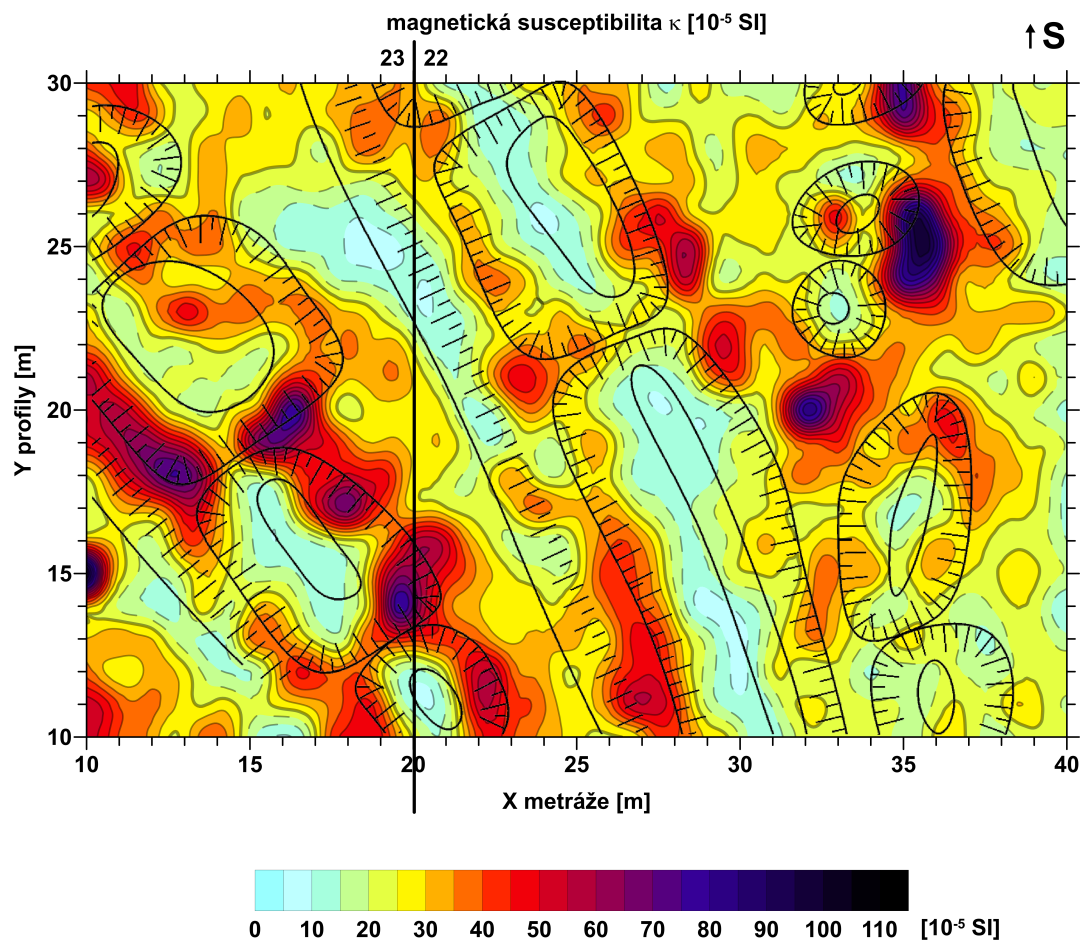
Střední kvadratická chyba měření vertikálního gradientu magnetického pole je  $\pm 2,4$  nT m<sup>-1</sup>.

## 5.6 Výsledky měření a jejich interpretace

Pro snazší určování polohy zavedeme značení [X – metráže; Y – profily].

### 5.6.1 Kapametrie

Hodnota magnetické susceptibility se může výrazně měnit i u velmi blízkých měření. Proto by se při interpretaci měla místa, kde je magnetická susceptibilita zvýšena izolovaně bez návaznosti na přilehlé body měření, posuzovat opatrně. Toto je příklad bodu [10;15] na Obr. 15, kde se vyskytuje maximální hodnota magnetické susceptibility ( $168 \times 10^{-5}$  SI), v přilehlých bodech je však magnetická susceptibilita nezměněna a toto místo není anomální ani v žádném měření jinou metodou.



Obr. 15. Mapa izolinií magnetické susceptibility [ $10^{-5}$  SI] měřené přístrojem Bartington MS2 s maximálním hloubkovým dosahem 10 cm.

Minimální hodnoty magnetické susceptibility uvnitř zemniček má pravděpodobně na svědomí vrstva nashromážděného listí v kombinaci s malým dosahem kapametru (maximální dosah přístroje je 10 cm, ale citlivost od prvních centimetrů rychle klesá).

Výsledky kapametrie vykazují velmi dobrou shodu s magnetometrií (Obr. 16 a Obr. 17), což naznačuje na mělké uložení zdrojů anomálií (roztrošený materiál z otopných zařízení, keramické střepy, železné úlomky).

Zvýšené hodnoty v oblasti bodů [10;20] až [13;18] na Obr. 15 (k hradu přivrácená strana zemničky ve čtverci 23) mohou být způsobeny navršením zeminy při výkopu (při kopání se vršila hlína na západní stranu jako obranný prvek, svrchní části zeminy jsou magneticky nejvíce obohaceny). Ke zvýšení hodnot také mohla přispět absence listí a travního porostu. Magnetické obohacení v této sekci potvrzují data z magnetometrie. Zajímavá je absence zvýšených hodnot u in-phase složky, ta by totiž měla ukazovat obdobné zvýraznění. Absence zvýraznění in-phase složky se dá vyložit mělkým zdrojem zvýšené susceptibility.

Anomálně vysoká hodnota susceptibility v bodech [15;19] a [16,5;20] na Obr. 15 (JV strana zemničky) je provázána anomálními projevy jak ve výsledcích magnetometrie (Obr. 16 a Obr. 17), tak v in-phase měřeních konduktometrem (Obr. 21), jedná se tedy o prokazatelné magnetické obohacení.

Magnetické obohacení v oblastech bodů [19,5;14] a [18;17,5] na Obr. 15 se nepotvrzuje u ostatních měření, ale bod mezi nimi ([18;16]) je anomální v datech magnetometrie (Obr. 16 a Obr. 17), konduktivity  $\sigma_1$  (Obr. 18), in-phase 2 (Obr. 22) a 3 (Obr. 23).

Zvýšené hodnoty v oblasti bodu [22,5;11] na Obr. 15 nemají oporu ve výsledcích magnetometrie ani konduktivity, pouze u in-phase 1 (Obr. 21) a slaběji u in-phase 2 (Obr. 22) a 3 (Obr. 23). Jedná se pravděpodobně o povrchově zvýšenou magnetickou susceptibilitu (např. kompaktifikace půdy).

Uprostřed zemničky na souřadnicích [10,5;27] a na jejím severním okraji [11,5;29] na Obr. 15 registrujeme zvýšené hodnoty magnetické susceptibility, což potvrzují data z magnetického i in-phase měření.

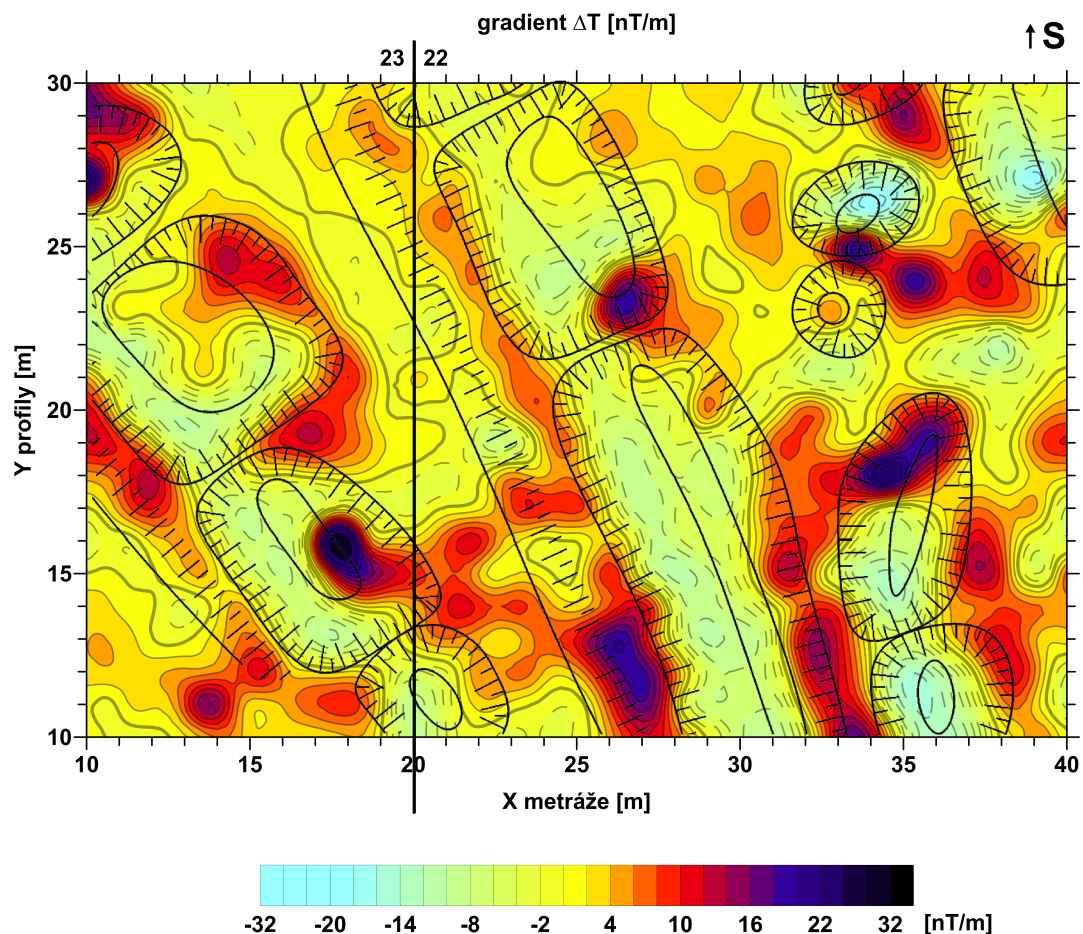
Velmi výrazné magnetické obohacení se vyskytuje v severní části čtverce 22 v okolí souřadnic [35,5;25] a [35;29] na Obr. 15, což je viditelné i na výsledcích magnetometrie a in-phase složek.

Vyšší hodnota v bodě [32;20] na Obr. 15 se potvrzuje v datech in-phase 1 (Obr. 21) a 2 (Obr. 22), oblast je výrazně anomální i ve výsledcích z konduktometrie, kde lze spatřit minimum a maximum v těsné blízkosti. U magnetometrie registrujeme jen nepatrné zvýšení.

V okolí bodu [27;13] (Obr. 15) na západním okraji zemničky lze spatřit zvýšené hodnoty magnetické susceptibility, které se potvrzují také magnetometrickým měřením. Jev není viditelný v in-phase měření.

Na JV cípu zemničky na souřadnicích [28,5;25] na Obr. 15 byly naměřeny zvýšené hodnoty susceptibility, které potvrzují i výsledky in-phase měření. Magnetometrie (Obr. 16 a Obr. 17) ukazuje navýšení poněkud dále, na souřadnicích [26,5;23].

Několik nadprůměrných hodnot bylo zachyceno v severní části zemničky okolo bodu [36;19,5] na Obr. 15. Tato anomálie se projevuje i ve všech výsledcích in-phase.



Obr. 16. Mapa izolinií vertikálního gradientu magnetického pole [ $\text{nT m}^{-1}$ ] měřené přístrojem GSM-19.

### 5.6.2 Magnetometrie

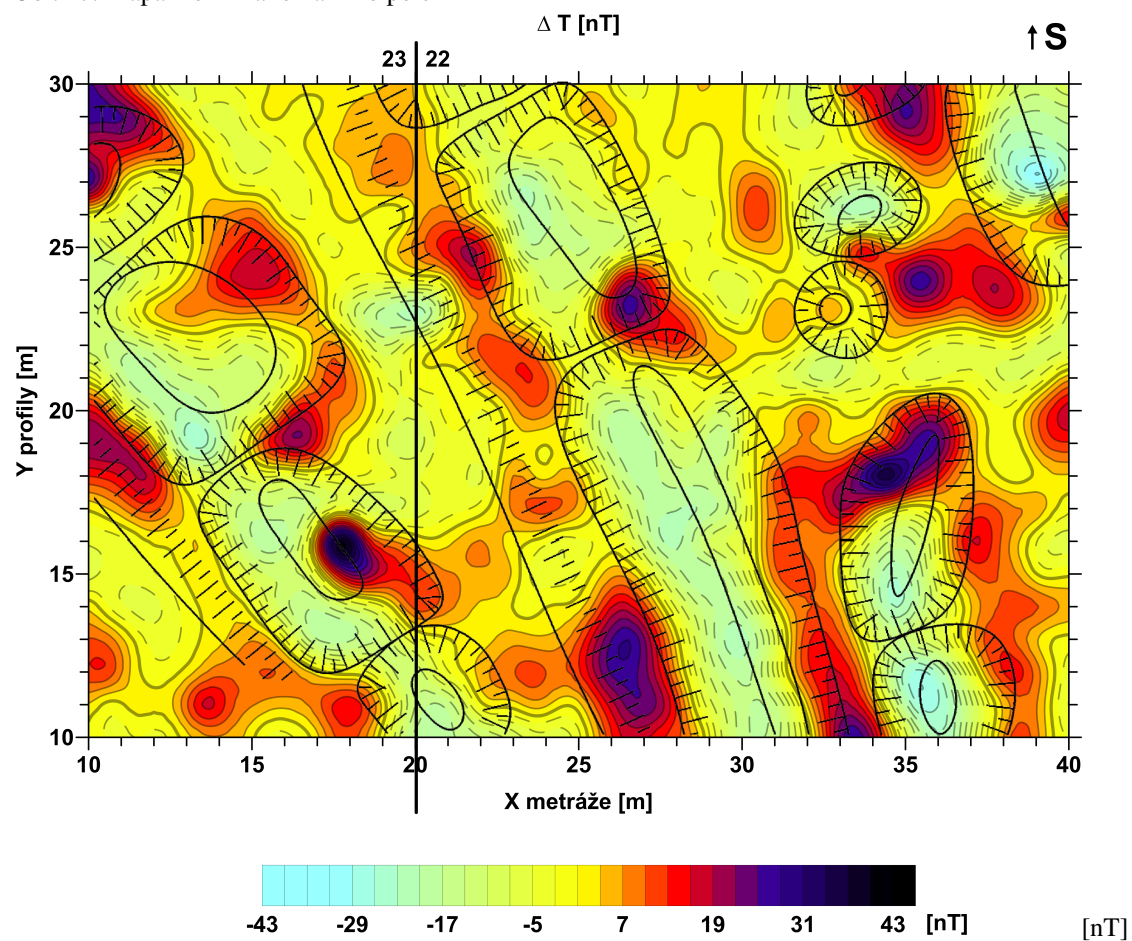
Kladné lokální extrémy se často vyskytují uvnitř zemniček při jejich okraji (Obr. 16 a Obr. 17), což může odpovídat akumulaci magnetického materiálu způsobené otopnými zařízeními.

Na k hradu přivrácené straně zemničky prochází bodem [21,5;25] na Obr. 16 pás zvýšených hodnot magnetického pole, který není viditelný v ostatních datech. Může se jednat o nahromadění magneticky obohaceného materiálu při vzniku zemniček nebo o pozůstatky dřevěných částí střechy zemničky (viditelné díky magnetotaktickým bakteriím).

Zvýšená hodnota se nachází na souřadnicích [33,5;25] v těsné blízkosti minima na souřadnici [34;26] na Obr. 16, která není znatelná u jiných měření.



Obr. 17. Mapa izolinií anomálního pole  $\Delta T$



měřené přístrojem GSM-19, variace registrovány přístrojem PM-2.

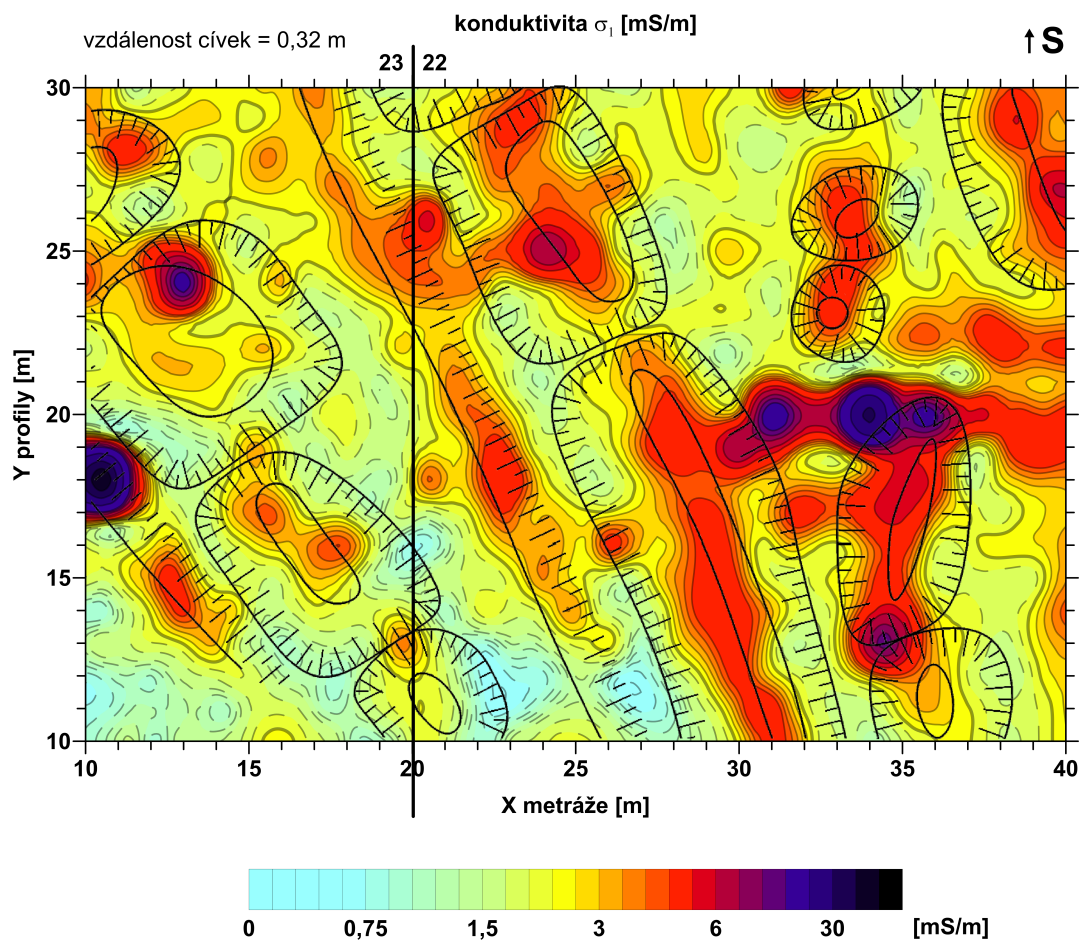
### 5.6.3 Konduktometrie

Konduktometrie  $\sigma_3$  (Obr. 20) má nejvyšší hloubkový dosah a výsledná mapa izolinií vodivosti koresponduje s morfologií terénu. V depresích je zvýšená vodivost pravděpodobně projevem podložních břidlic, anomálie se neprojevily na jiných než vodivostních mapách. Výše položené útvary odpovídají vyšší mocnosti pokryvu, který je pravděpodobně tvořen kamenitým materiálem s vyšším odporem.

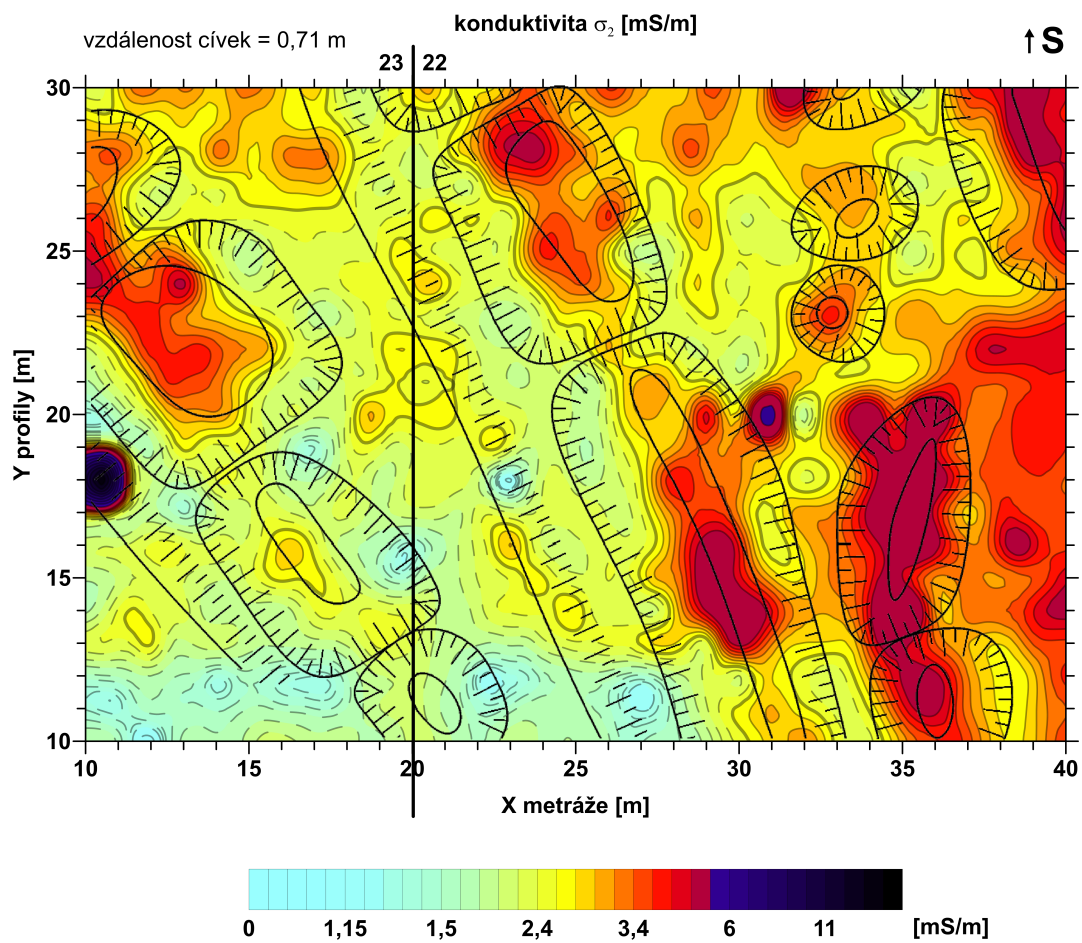
Mapy konduktivity  $\sigma_2$  (Obr. 19) a  $\sigma_3$  (Obr. 20) vykazují vyšší stupeň segmentace a ukazují podpovrchové anomálie. Zvýšená vodivost hřbetu před zemničkami u konduktometrie  $\sigma_1$  (Obr. 18) je zřejmě způsobená silnější vrstvou vlhčího hlinitého materiálu.

V bodech [10,5;17] a [10,5;18] lze vidět vysoké hodnoty vodivosti u všech vodivostních map, viditelné také na in-phase měření. Anomální hodnoty nebyly v tomto místě pozorovány u měření jinými metodami. Zdrojem anomálie může být železný artefakt či propálené místo. Jelikož není místo zvýrazněno v datech magnetické susceptibility měřené kapametrem (Obr. 15), bude objekt nejspíše uložen ve větších hloubkách, než několik cm pod povrchem.

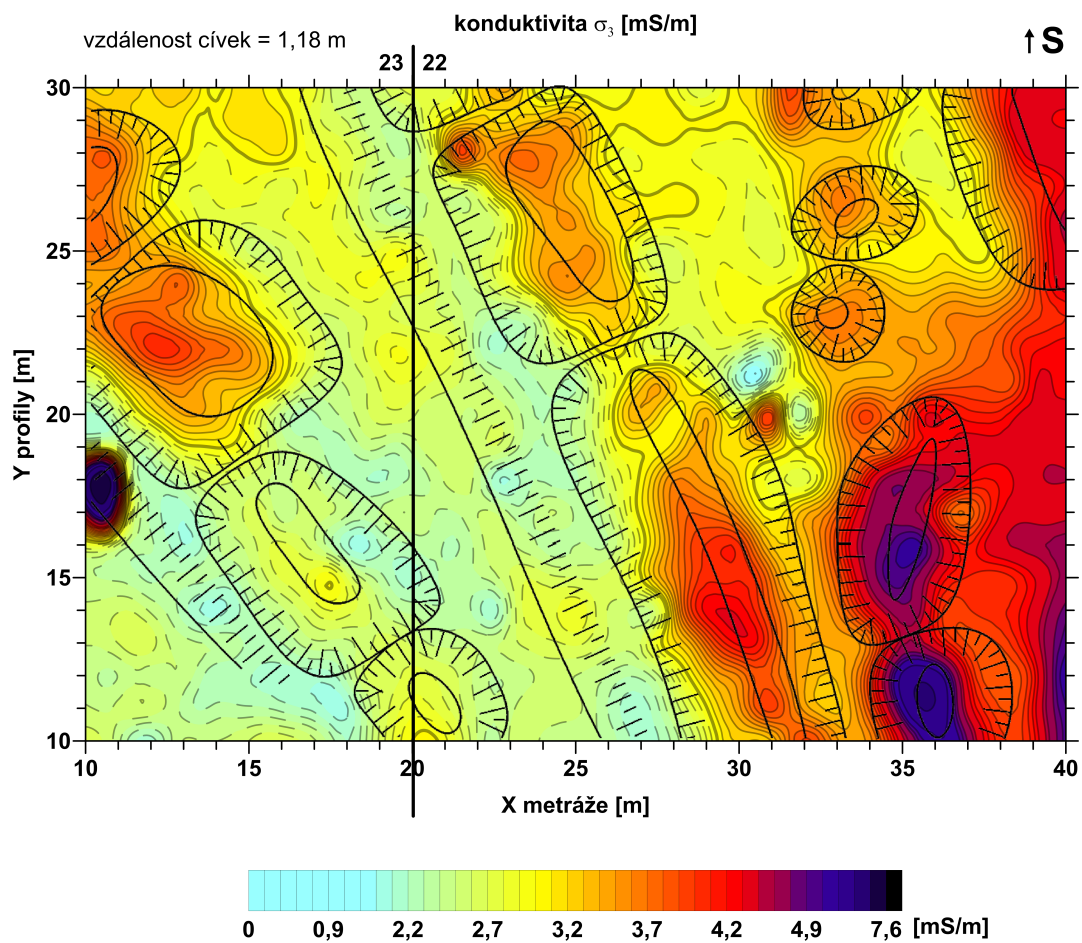
Mezi body [31;20] až [37,5;20] se v datech konduktometrie  $\sigma_1$  (Obr. 18) táhne pás extrémně vysoké vodivosti, který se vzrůstající hloubkou rychle vyznívá (konduktometrie  $\sigma_2$  na Obr. 19 a  $\sigma_3$  na Obr. 20). Jev je méně výrazný v projevech in-phase a magnetické susceptibility. Může se jednat o kovové předměty při povrchu.



Obr. 18. Mapa izolinií měrné zdánlivé vodivosti [ $\text{mS m}^{-1}$ ] měřené přístrojem CMD-MiniExplorer se vzdáleností cívek 0,32 m a hloubkovým dosahem 0,5 m.



Obr. 19. Mapa izolinií měrné zdánlivé vodivosti [ $\text{mS m}^{-1}$ ] měřené přístrojem CMD-MiniExplorer se vzdáleností cívek 0,71 m a hloubkovým dosahem 1,0 m.



Obr. 20. Mapa izolinií měrné zdánlivé vodivosti [ $\text{mS m}^{-1}$ ] měřené přístrojem CMD-MiniExplorer se vzdáleností cívek 0,71 m a hloubkovým dosahem 1,8 m.

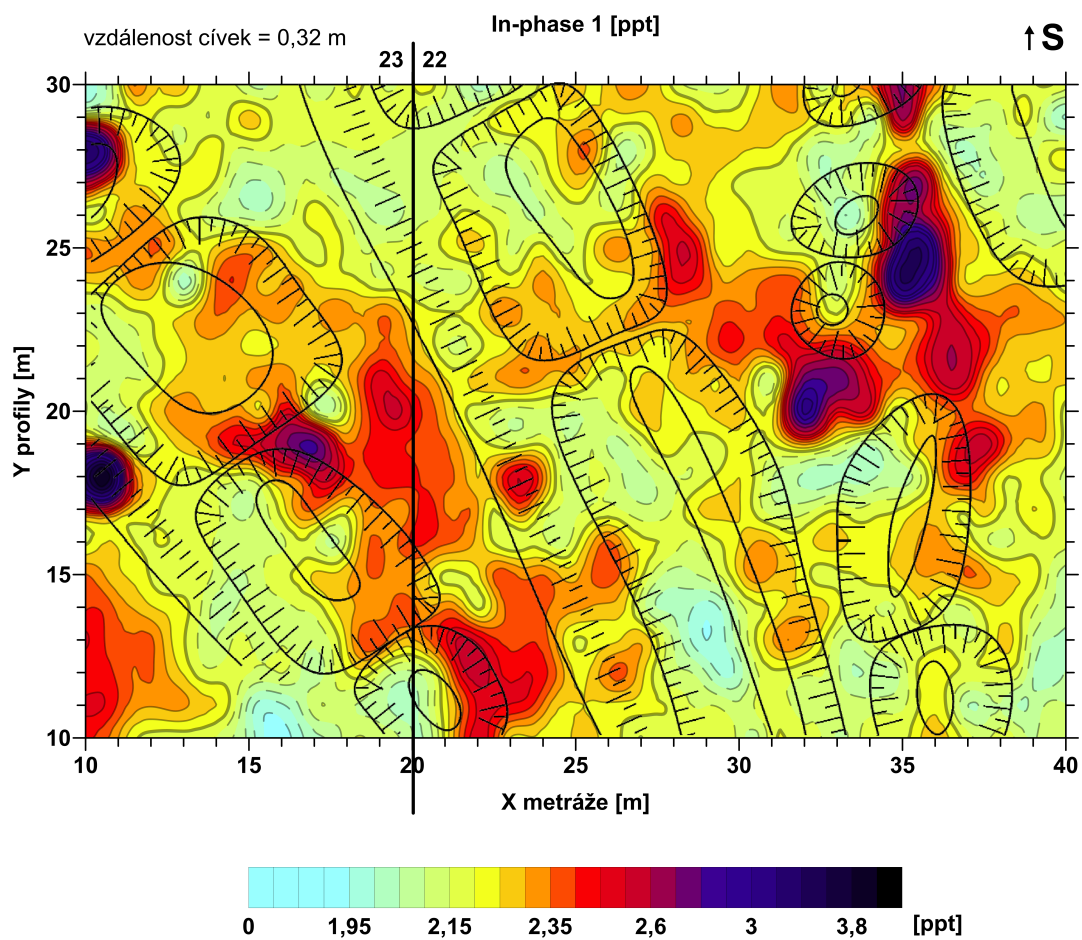
#### 5.6.4 In-phase

Ve všech mapách izolinií in-phase (Obr. 21, Obr. 22 a Obr. 23) jsou více či méně patrná lokální maxima, která mohou odpovídat železným úlomkům, propáleným polohám nebo větším akumulacím úlomků keramiky.

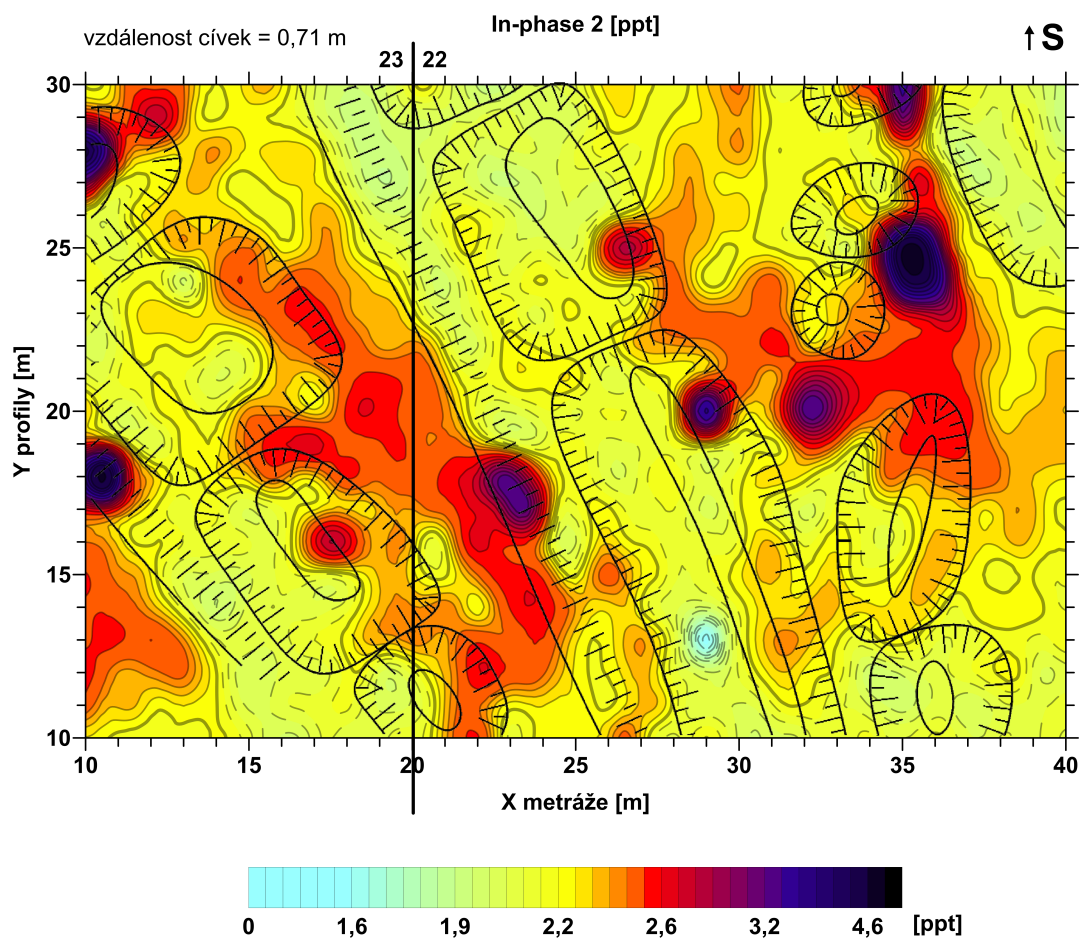
Často se opakujícím jevem jsou anomálie uvnitř zemniček při obvodu. Jedná se zřejmě o projev ohnišť či jiných otopných zařízení.

Zajímavá je absence magneticky obohacené vrstvy uvnitř zemniček, což může být způsobeno krátkým trváním obléhání (na podlaze se nestihly nahromadit organické zbytky) či důkladným vyklizením tábora po skončení obléhání (tlející dřevěné podlahy by se mohly anomálně projevit u kapametrie, magnetometrie a in-phase měření díky magnetotaktickým bakteriím). Vyšší hodnoty na hřbetech mohou být způsobeny uložením magneticky obohaceného materiálu při budování zemniček.



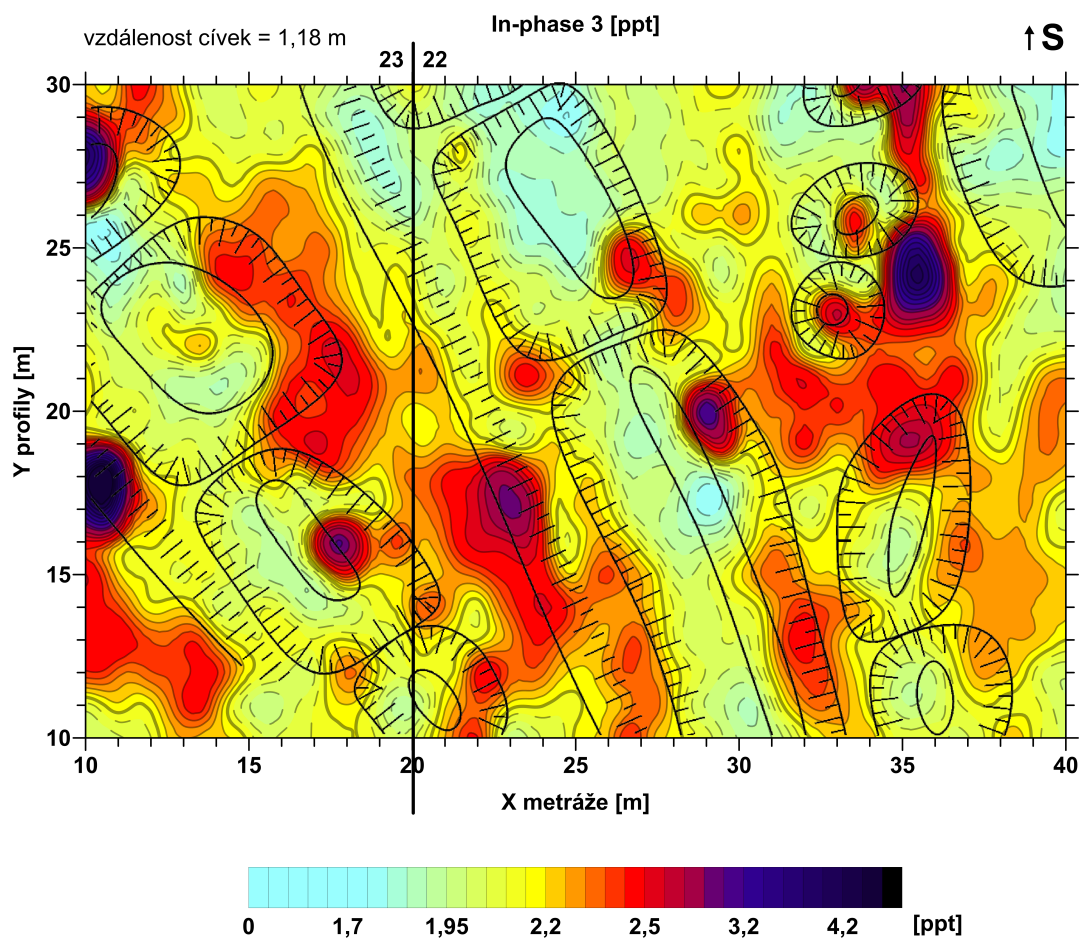


Obr. 21. Mapa izolinií in-phase složky [ppt =  $10^{-3}$ ] měřené přístrojem CMD-MiniExplorer se vzdáleností cívek 0,32 m a hloubkovým dosahem 0,5 m.



Obr. 22. Mapa izolinií in-phase složky [ppt =  $10^{-3}$ ] měřené přístrojem CMD-MiniExplorer se vzdáleností cívek 0,71 m a hloubkovým dosahem 1,0 m.





Obr. 23. Mapa izolinií in-phase složky [ppt =  $10^{-3}$ ] měřené přístrojem CMD-MiniExplorer se vzdáleností cívek 1,18 m a hloubkovým dosahem 1,8 m.

## DISKUZE

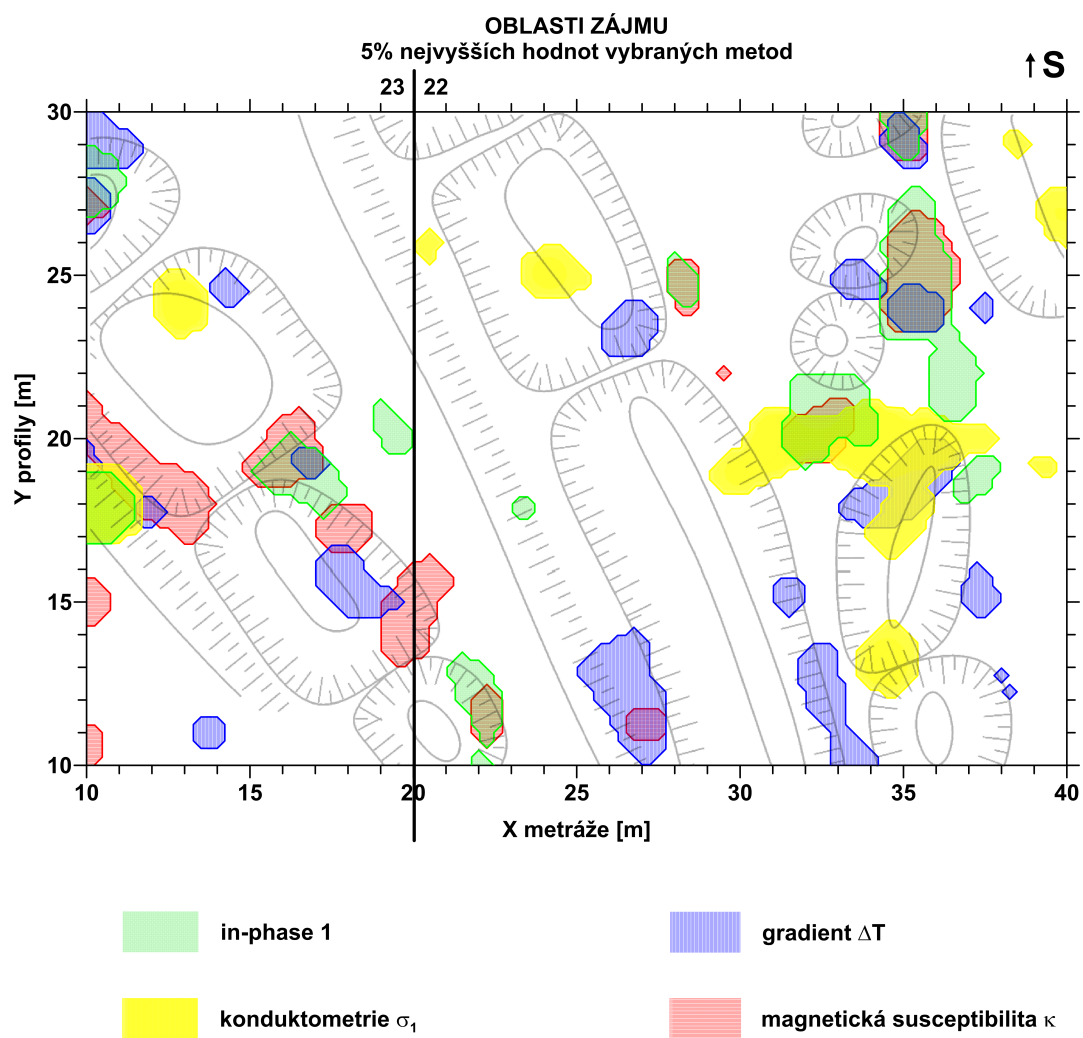
Výsledky měření magnetické susceptibility se dobře shodují s výsledky magnetometrického průzkumu a výsledky měření in-phase složky, pokud vezmeme v úvahu odlišný hloubkový dosah jednotlivých metod. Přístroj Bartington MS2, použitý k měření magnetické susceptibility, má efektivní hloubkový dosah pouze několik cm a tedy jakýkoli nedostatečný kontakt s povrchem může výrazně snížit naměřené hodnoty. V prostoru zemniček se nachází poměrně silná vrstva listí, což pravděpodobně způsobilo nízké hodnoty magnetické susceptibility v těchto místech. Jelikož jsou hodnoty nižší také u in-phase složky, může to vypovídat o důkladném vyklizení artefaktů z oblasti uvnitř zemniček.

Magnetická susceptibilita svrchní části půdy je silně lokální záležitostí a tedy až několik vyšších hodnot, prostorově málo vzdálených, může indikovat magnetické obohacení. K izolovaným hodnotám vysoké magnetické susceptibility by se mělo přistupovat s opatrností a konfrontovat je s výsledky dalších metod (zejména magnetometrie a in-phase). Lokálně zvýšené hodnoty mohou odpovídat železným úlomkům, keramice či zbytkům spalování.

Dalo by se očekávat, že valy před zemničkami (směrem k hradu) budou vykazovat vyšší obsah magnetických částic, protože je zde koncentrována svrchní část půdy přemístěná při stavbě zemniček. Výsledky magnetometrie a měření magnetické susceptibility toto částečně potvrzují, ukazují lineární struktury právě v těchto oblastech. Obdobné lineární struktury jsou viditelné také u měření elektrické vodivosti v malých hloubkách ( $\sigma_1$ ), což zřejmě souvisí s vyšším obsahem vlhkosti v hlinitém materiálu.

Vyšší lokální hodnoty magnetického pole uvnitř zemniček při jejich okraji by mohly odpovídat umístění otopných zařízení (viz Obr. 24). Působením tepla dochází k přeměně minerálů na magneticky výraznější formy.

Výsledky měření elektrické vodivosti v nejvyšších hloubkách ( $\sigma_3$ ) odpovídají morfologii terénu a zvýšené hodnoty vodivosti v depresích jsou pravděpodobně způsobeny podložními břidlicemi. Zvýšená vodivost u povrchu může indikovat vyšší vlhkost v hlinitém materiálu, lokálně také kovové artefakty (železné, pokud je v místě také silný magnetický signál).



Obr. 24. Oblasti zájmu, 5 % nejvyšších hodnot vybraných metod.

## ZÁVĚR

Měření magnetické susceptibility se ukazuje být vhodnou metodou v archeologické prospekci. V této práci bylo ukázáno její využití při komplexní interpretaci s výsledky jiných metod (magnetometrie a konduktometrie). Magnetická susceptibilita byla měřena ve čtyřech hloubkách - při povrchu jednocívkovým přístrojem a pak ve třech větších hloubkách jako tzv. in-phase složka, což umožňuje odhadnout vertikální polohu objektu zájmu. Díky citlivosti pouze na indukovanou složku magnetického pole doplňuje měření magnetické susceptibility vhodným způsobem výsledky magnetometrického průzkumu a pomáhá při jeho interpretaci.

Měření povrchové magnetické susceptibility přístrojem Bartington MS2 se ukázalo být přibližně dvakrát rychlejší než měření ostatními přístroji (magnetometr, konduktometr) a může tedy sloužit pro předběžné zhodnocení dané lokality. Nevýhodou je absence záznamového zařízení, což zdvojnásobuje personální náklady (jedna osoba měří a druhá zapisuje).

Měření dynamické magnetické susceptibility (tzv. in-phase složky) přístrojem CMD-MiniExplorer je relativně pomalé z důvodu pomalého přenosu dat z přístroje do záznamového zařízení technologií Bluetooth a jejich ukládání. Výhodou je obsluha jedinou osobou a měření v šesti různých hloubkových úrovních (tři vzdálenosti cívek  $\times$  měření v plném či polovičním hloubkovém rozsahu).

Měření magnetické susceptibility lze také použít pro předběžný průzkum na rozlehlém území, kterým se identifikují kulturně využívané oblasti pro podrobnější měření jinými metodami. Tato aplikace nemohla být předvedena v této práci, jelikož je poloha husitského tábora velmi dobře patrná z morfologie terénu.

V rámci této práce byla proměřena malá část husitského ležení několika různými metodami. Jelikož se jedná o nepřímou geofyzikální úlohu, je interpretace výsledků měření velmi složitá. Bylo by vhodné provést archeologický průzkum měřené oblasti a dát do souvislosti výsledky měření a zjištěné archeologické situace. Až na základě tohoto srovnání by bylo možné provést finální zhodnocení jednotlivých metod. Metody, které by se ukázaly jako nejvíce informativní, lze použít pro geofyzikální průzkum jiných částí tábora.

Věřím, že získané výsledky geofyzikální prospekce vybrané části husitského tábora budou sloužit jako užitečný podklad pro budoucí archeologický výzkum a nasměrují archeologické pracovníky správným směrem v jejich další práci.

## POUŽITÁ LITERATURA

ASTM, 2008, D6639 Standard Guide for Using the Frequency Domain Electromagnetic Method for Subsurface Investigations, <http://www.astm.org/Standards/D6639.htm>, 21.6.2014

Bartington MS2/MS3, 2014, <http://www.bartington.com/Literaturepdf/Datasheets/MS2-MS3%20DS0020.pdf>, 27.7.2014

Bartoníček A., 1940. *Kunratický Nový hrad krále Václava IV. – Pobožené královské sídlo u Prahy*. Praha, 16 str.

Bauer J., 2005. *Tajnosti českých hradů a zámků 3*. Vydavatelství Akcent, Třebíč, str. 15-24.

Bennett L. H., Page C. H., Swartzendruber L. J., 1977. Comments on Units in Magnetism. *JOURNAL OF RESEARCH of the National Bureau of Standards*, 83(1): 9-12.

Bezvoda V., Langer J., 1979. *Teorie pole v užité geofyzice*. SPN, Praha, 125 str.

Bláhová M., 1979. *Vavřinec z Březové – Husitská kronika, Píseň o vítězství u Domažlic*. Svoboda, Praha, 427 str.

Clark A., 1996. *Seeing beneath the soil: prospecting methods in archaeology*. B.T. Batsford, London, 176 str.

Dalan R. A., 2008. A review of the role of magnetic susceptibility in archaeogeophysical studies in the USA: recent developments and prospects. *Archaeol. Prospect.*, 15(1): 1-31.

David A., 1995. *Geophysical Survey in Archaeological Field Evaluation*. English Heritage Society, London, 60 str.

Dearing J. A., Hay K. L., Baban S. M. J., Huddleston A. S., Wellington E. M. H., Loveland P. J., 1996. Magnetic susceptibility of soil: an evaluation of conflicting theories using a national data set.

*Geophys. J. Int.*, 127: 728-734.

Dolejší J., Křížek L., 2009. *Husité-vrchol válečného umění v Čechách*. Elka Press, Praha, 368 str.

Drobná Z., 1953. Husitský polní tábor u Kunratic. *Historie a vojenství*. Naše vojsko, Praha, 1953, svazek 2, str. 197-200.

Durdík J., 1953. *Husitské vojenství*. Naše vojsko, Praha 1953, 242 str.

Durdík T., 1995. *Encyklopedie českých hradů*. LIBRI, Praha, 368 str.

Durdík T., 1999. *Ilustrovaná encyklopedie českých hradů*. LIBRI, Praha, 720 str.

Evans M. E., Heller F., 2003. *Environmental Magnetism: Principles and Applications of Enviromagnetism*. Academic Press, New York, 304 str.

Fritz B., McFarland D., Hertz W., Gamey J., 2011. *Application of Magnetic and Geotechnical Methods for Archeological Site Investigations*. SERDP Project RC-1697. Dostupné z: <http://www.serdp.org/content/download/11702/143506/file/RC-1697-TR.pdf>, 4.5.2014

Geomapa 1 : 50 000, 2014, <http://www.geology.cz/app/ciselniky/lokalizace/>, 27.7.2014

GF Instruments, 2013. *Short guide for electromagnetic conductivity mapping*, Dostupné z: [http://www.gfinstruments.cz/version\\_cz/downloads/CMD\\_Short\\_guide-2013.pdf](http://www.gfinstruments.cz/version_cz/downloads/CMD_Short_guide-2013.pdf), 27.7.2014

Gruntorád J., 1985. *Principy metod užité geofyziky*. SNTL, Praha, 190 str.

Herchel R., Tuček J., Trávníček Z., 2009. *Střídavá susceptibilita a vysokoteplotní magnetická měření a jejich využití v chemii a fyzice*. Přírodovědecká fakulta UP, Olomouc. Dostupné z: [http://apfyz.upol.cz/ucebnice/down/Ulohy\\_AC.pdf](http://apfyz.upol.cz/ucebnice/down/Ulohy_AC.pdf), 11.5.2014

Hunt C.P., Moskowitz B.M., Banerjee S.K., 1995. Magnetic Properties of Rocks and Minerals. In: *Tomas J. Ahrens (ed.) Rock Physics and Phase Relations: a Handbook of Physical Constants*, str. 189-204.

Chlupáč I., 1988. *Geologické zajímavosti pražského okolí*. Academia, Praha, 252 str.

INGV, 2014, Elements of the geomagnetic field, [http://roma2.rm.ingv.it/en/research\\_areas/1/earths\\_magnetic\\_field/8/elements\\_of\\_the\\_geomagnetic\\_field](http://roma2.rm.ingv.it/en/research_areas/1/earths_magnetic_field/8/elements_of_the_geomagnetic_field), 21.6.2014

Kapička A., Petrovský E., 2004. Magnetismus hornin a jeho aplikace při studiu znečištění životního prostředí. *Československý časopis pro fyziku*, 54(4), str. 240-243.

Koscelník P., 2013. Využití lidarových dat v archeologii konfliktu středověku: obléhací práce z 15. století. *Archeologie a letecké laserové skenování krajiny*. FF ZČU, Plzeň, str. 190-199.

Kotrlová J., 2013. *Kunratice v běhu času*. Gasset, Praha, 288 str.

Kypta J., Podliska J., 2013. *Nálezová zpráva: PRAHA 4 - KUNRATICE, povrchový (nedestruktivní) výzkum reliktní obléhací práce v předpolí Nového hradu u Kunratic, pč. 863/1 (Č. j. 311/96021/2013)*. Národní památkový ústav ÚOP v hl. m. Praze a ÚOP středních Čech, 16 str., 15 příl.

Lowrie W., 1997. *Fundamentals of Geophysics*. Cambridge University press, Cambridge, str. 229-305.

Mareš S., 1979. *Úvod do užité geofyziky*. SNTL, Praha, 590 str.

Martien D., 2002. *AC Magnetic Measurements*. Quantum Design. Dostupné z: [http://ipc.iisc.ernet.in/~magsquid/qd\\_acsusceptibility\\_deen.pdf](http://ipc.iisc.ernet.in/~magsquid/qd_acsusceptibility_deen.pdf), 11.5.2014

Menclová D., 1972. *České hrady, díl druhý*. ODEON, Praha, 549 str.

Merhout C., 1912. *Čtení o Novém hradě a Kunraticích*. Ústřední nakladatelství učitelstva Československého Josef Rašín, Praha, 96 str.

NOAA, 2014, <http://www.ngdc.noaa.gov/geomag-web/#igrfwmm>, 21.6.2014

Overhauser, 2008, <http://www.gemsys.ca/pdf/GSM-19%20Overhauser%20v7.0.pdf>, 27.7.2014

Piro S., 2009. Introduction to Geophysics for Archaeology. In: Campana, Piro (ed.) *Seeing the Unseen: Geophysics and Landscape Archaeology*. Taylor & Francis Group, London, str. 27-64.

PM-2, 2011, <http://26vv.com/high-progress-magnetometer-2/>, 27.7.2014

Quijano L., Gaspar L., Chaparro M. A. E., Navas A., 2011. Magnetic susceptibility in topsoils and

bulk cores of cultivated calcisols. *Latinmag Letters*, Volume 1, Special Issue 2011: 1-6.

Reynolds J., 2011. *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics, second edition*. Wiley-Blackwell, Chichester, 696 str.

Sedláček A., 1998. *Hrady, zámky a tvrze Království českého, díl patnáctý – Kouřimsko, Vltavsko a Jihozápadní Boleslavsko*. ARGO, Praha, str. 230-235.

Schmidt A., 2007. Archeology, Magnetic Methods. In: Gubbins D., Herrero-Bervera E. (eds.) *Encyclopedia of Geomagnetism and Paleomagnetism*. Springer, New York, str. 23-31.

Schmidt A., 2009. Electrical and magnetic methods in archaeological prospection. In: Campana, Piro (ed.) *Seeing the Unseen: Geophysics and Landscape Archaeology*. Taylor & Francis Group, London, str. 67-81.

VŠCHT, 2014. *Validační program pro statistické zpracování analytických dat*. VŠCHT, Praha. Dostupné z: [http://www.vscht.cz/ktk/www\\_324/lab/texty/ana/validace.pdf](http://www.vscht.cz/ktk/www_324/lab/texty/ana/validace.pdf), 27.7.2014